Desenvolvimento de um forno de indução para fusão e vazamento de ligas de titânio e outras ligas reactivas

Zollern & Comandita Portugal e INEGI

Bruno António Fernandes Martins

Relatório do Projecto Final / Dissertação do MIEM

Orientador no INEGI: Eng.º Rui Neto

Orientador na FEUP: Prof. Jorge Lino

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

05/2008

RESUMO

Num futuro próximo o titânio (Ti) vai ter um papel bastante importante na vida das sociedades desenvolvidas. Como produto abundante e mais barato vai ser responsável por fornecimento de água potável, prolongar a esperança de vida através de prótese e implantes, redução nas emissões de carbono na indústria automóvel e redução no peso de carros e equipamentos civis e militares.

Para colmatar a falta de fornecedores de produtos fundidos em ligas de Ti na indústria automóvel, a Zollern e o INEGI uniram esforços para a investigação e desenvolvimento de um processo de produção de impulsores em ligas de Ti para utilização em turbocompressores.

Neste contexto, esta tese de mestrado apresenta o projecto e desenvolvimento de um forno de fusão e vazamento de ligas de Ti, baseado na técnica das pressões diferenciais, permitindo a obtenção de peças fundidas de paredes finas, da ordem dos 0,3 a 0,5mm.

Seguindo a metodologia de desenvolvimento de novos produtos proposta por Ulrich e Eppinger, foi projectada uma estrutura composta por duas câmaras, uma superior para fusão da liga metálica e outra para vazamento, que é móvel é separada da primeira por um fusível em Ti, que funde para dar passagem ao metal líquido que preenche a cavidade moldante colocada no interior da uma câmara de vazamento.

Tendo como base testes experimentais realizados em quatro fornos de indução diferentes, foram definidas as características da unidade de potência e bobines e tendo em conta as necessidades e os requisitos previamente estabelecidos, foi concebido e seleccionados um sistema de vácuo, bombas, sensores e electroválvulas para construção do mesmo.

Pretende-se obter um equipamento modular e flexível, que permita ser ajustado para diferentes tipos de moldações e capacidade de fusão de diferentes tipos de metais reactivos. O sistema de vácuo é independente e dedicado a cada câmara, permitindo maior controlo das pressões de vácuo entre estas; a compactação e versatilidade de todo o equipamento, relativamente às soluções existentes no mercado; e a maior segurança de operação no que diz respeito à fusão de Titânio, são as características inovadoras deste trabalho.

FURNACE FOR MELTING AND CASTING TITANIUM AND OTHER REACTIVE ALLOYS

ABSTRACT

In a near future titanium will play a major role in everyday life of modern societies. As an abundant and cheaper product it will be responsible for the supply of drinking water, extension of life expectancy with prosthesis and implants, reduction of carbon emission by the automotive industry and reduction in the weight of cars, military and civilian equipment.

In an attempt to face the lack of supply of titanium melted alloys in the automotive industry, Zollern and INEGI gathered efforts to investigate and develop a process for the production of titanium alloys compressor wheels to be used in turbocompressors.

This master thesis presents the project and development of a furnace for the melting and casting of titanium alloys, based on the differential pressures technique, allowing for the production of melted pieces with thin walls, around 0,3 to 0,5mm.

Following the methods for the production of new products, proposed by Ulrich and Eppinger, a structure with two chambers was projected. The upper chamber is used for melting the metal alloy and the other one, movable, for casting. They are separated by a titanium penny that melts and gives way to the liquid metal that fills the moulding cavity inside the casting chamber.

The characteristics of the power unit and coils were defined based on experimental tests conducted in four different induction furnaces, and the vacuum system, bombs, sensors and electro-valves were selected regarding the previously established necessities and requisites.

The goal was to create a flexible equipment adjustable to different types of moulding and capable of melting different types of reactive metals. The vacuum system is independent and dedicated to each chamber which enables a better control of the vacuum pressures between them. Compared to the other options available, the equipment is more compact and versatile and allows for a safer titanium casting operation. These are the innovations of the project.

AGRADECIMENTOS

Ao Eng.º Rui Neto e ao Professor Jorge Lino, orientadores deste trabalho, o meu sincero agradecimento por todas as sugestões, conselhos e correcções propostas e pela confiança em mim depositada.

Ao Eng.º Virgílio Oliveira, director da Zollern Portugal, a permissão e o apoio para a realização deste trabalho e a organização dos trabalhos realizados na Zollern GbmH;

Ao Bártolo Paiva, um agradecimento especial pelo apoio, incentivo, sugestões e ajuda durante a realização deste trabalho.

Ao Ricardo Paiva, quero agradecer a sua ajuda e sugestões na definição do sistema de indução.

Aos colaboradores do INEGI – CETECOFF, Armanda Marques, Maria do Carmo Fernando Moreira, Sertório Lares e Nuno Santos agradeço sinceramente toda a amizade, disponibilidade e apoio que sempre me manifestaram.

À Professora Teresa Duarte as informações e ajuda no decorrer deste projecto;

À Eng.ª Vanda Tavares, STV, Lda, pelos conselhos, apoio e suporte técnico na definição dos sistemas de vácuo;

Ao meu amigo Pedro Simões, Termolab, pelo apoio, sugestões e conselhos ao longo deste trabalho;

Ao Joaquim Conde, INEGI, a disponibilidade, ajuda e os conselhos no trabalho de projecto mecânico;

Ao Bruno Fragoso a ajuda durante a estadia na Zollern GbmH;

À minha família (pais e irmão) e à Molly agradeço o apoio, o carinho e a paciência demonstrados. E peço desculpa pelo tempo que não vos dediquei para poder realizar este trabalho.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 6

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 5

CAPÍTULO 6

ABREVIATURAS

A
ADI – Agência de Inovação;
Al – Alumínio;

B
B – Boro;
BE – Blended Elemental Powder;

C
CaO – Óxido de Cálcia;
CCC – Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado;
Cr – Crómio;

D
DAE – Direct Arc Electrod;
DB – Difusion Bonding;
DMLF – Direct Metal Laser Casting;

E
EBM- Electron Beam Melting
ESR – Electroslag Remelting

F
Fe – Ferro;
$FeTiC_3$ – Ilmenite;

G
Ga – Galio;
Ge - Germânio;
GDP – Gross Domestic Products;
GMM – Gravity Metal Mould;

H
HC – estrutura cristalina Hexagonal Compacta;
HDH - Hydride DeHydride;
HIP – Hot Isostatic Pressure;
HPC – High Pressure Compressors ;

I
IGBT - (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IFIMUP – Instituto de Física e dos Materiais da Universidade do Porto (Faculdade de Ciências);
INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial;
ITA – International Titanium Association;

L
LPC – Low Pressure Compressors;

M

MgO – Óxido de magnésio;
Mn – Manganês;
Mo – Molibdénio ;
MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transístor;
MP – Metalurgia dos Pós

N
NNS – Near Net Shape (formas próximas das formas finais pretendidas)

P
PA – Prealloyed Powders;
PAM – Plasma Arc Remelting
Pd – Paládio;
PVD – Physical Vapor Deposition;

R
RSR –Rapid Solidification Rate Powder Mettalurgy

S
SLS - Selective Laser Sintering;
SNAPP – Simultaneous Non Consumable Arc/Melting/Plasma Refining;
Sn – Estanho;
SPF – Superplastic forming;
SSF – Solid state spray forming;

T
Ti – Titânio;
TiAl – Aluminetos de titânio;
$TiCl_4$ – Tetracloreto de Titânio;
TMC – Titanium matrix composite;
TiO_2 – Dióxido de Titânio;

V
V – Vanádio;
VAR – Vacuum Arc Remelting;
VDC – Vacuum Die Casting;
Y
Y_2O_3 – Óxido de itrio

Z
Z_1O_2 – Dióxido zircónio;
ZCP – Zollern e Comandita Portugal.

SIMBOLOS

C – Capacitância dos condensadores (micro faraday);

d – Diâmetro exterior da peça metálica;

D – Diâmetro da bobine;

F – Frequência (Hz);

H – altura da bobine.

Kr – constante de transferência de potência em função da relação d/p;

I – corrente na bobine;

L – indutância da bobine;

N – número de espiras da bobine;

p – profundidade de penetração do efeito de pele;

P – potência na fonte de potência

Pactiva – potência do circuito normal, que é lida na unidade de potência;

Pp – potência transmitida à peça;

Preactiva – potência do circuito ressonante;

Q – factor de qualidade;

Re – resistência equivalente

Rb - resistência da bobine

S – superfície da peça;

T – tensão na fonte de potência;

U – tensão no circuito ressonante;

Z – impedância;

Ø – Diâmetro;

η – Rendimento eléctrico;

ηe - eficiência eléctrica;

ρ – Resistividade do material (resistência eléctrica);

μo – constante de permeabilidade magnética = $4\pi \times 10^{7}$ Wb/A.m;

μm – permeabilidade magnética do material;

$\frac{\Delta\phi_\beta}{\Delta T}$ - razão da variação da força electromagnética

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO AO PROJECTO

As crescentes preocupações ambientais levam a que os principais construtores automóveis procurem incessantemente novas soluções para o cumprimento da legislação cada vez mais restritiva. Assim, a redução das emissões de carbono é uma meta a atingir quanto antes, e nesse sentido, a redução do peso dos novos automóveis e o aumento da taxa de compressão nos turbocompressores, por exemplo, são duas medidas importantes no cumprimento dessas medidas. Para a materialização destas soluções, grande parte dos construtores de automóveis têm adoptado ligas de Ti (titânio), que possuem características mecânicas semelhantes ao aço, mas com metade da densidade.

Para além da indústria automóvel, estas ligas são cada vez mais usadas em indústrias tão diferentes como a aeronáutica, a medicina, o desporto e a joalharia. A combinação de propriedades únicas tais como a excelente relação densidade/resistência mecânica, a boa resistência à corrosão, a boa resistência à fadiga e a bio-compatibilidade tornam-nas cada vez mais requisitadas nas mais diversas aplicações. Contudo, a sua utilização actual ainda é limitada pelo preço excessivo dos produtos finais, principalmente devido ao elevado custo de extracção, mas também dos processos de transformação que são difíceis e dispendiosos.

Neste sentido, as tecnologias *near net shape* (NNT), apresentam-se como uma alternativa válida e menos dispendiosa do que as restantes. A fundição tem sido a tecnologia de processamento para as ligas de Ti que maior crescimento conheceu nas últimas décadas. Porém, a fundição de ligas de Ti apresenta-se como um verdadeiro desafio como consequência das características próprias destas ligas: elevado ponto de fusão, baixa fluidez e elevadíssima reactividade. Mas se em peças

de grandes dimensões e paredes espessas estas dificuldades estão praticamente ultrapassadas, nas peças de paredes finas há ainda algum caminho a percorrer, principalmente quando se tratam de geometrias complexas que não permitem a utilização de moldes metálicos arrefecidos.

Actualmente existem vários trabalhos de investigação e desenvolvimento (principalmente na industria militar dos EUA) que reclamam a obtenção de peças fundidas em ligas de Ti com espessura de parede entre 0,5 e 0.9mm, através da técnica de *investment casting* (fundição de precisão). Contudo, industrialmente esta meta parece ainda não ser uma verdade, a julgar, p.e, pela elevada procura levada a cabo pela indústria automóvel numa solução para a obtenção de impulsores de turbocompressores em ligas de Ti por fundição, que substitua os impulsores que actualmente são maquinados, com elevados custos de produção e acabamento superficial que compromete o seu desempenho.

Assim e beneficiando da larga experiência na fundição de precisão e do excelente posicionamento junto de fornecedores deste tipo de produto, a Zollern & Comandita (ZCP, multinacional Alemã com uma fábrica em Portugal dedicada à fundição de precisão de peças em aço), juntamente com o INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), decidiram avançar para o desenvolvimento de um processo para produção de impulsores para turbocompressores em ligas de Ti, ao qual deram o nome de COMTICAST.

1.2 – APRESENTAÇÃO DO PROJECTO COMTICAST

O projecto COMTICAST consiste numa actividade de investigação e desenvolvimento levada a cabo pela parceria formada entre o INEGI e a ZCP.

O INEGI é um instituto de investigação que tem como principal objectivo contribuir para o desenvolvimento da indústria nacional através de investigação, desenvolvimento e transferência de tecnologia em diversas áreas. O INEGI tem responsabilidades neste projecto a nível do desenvolvimento das diferentes tecnologias associadas à fusão de ligas de Ti, nomeadamente no projecto e fabrico de ferramentas, moldações cerâmicas, tecnologia de fusão e vazamento de ligas de Ti.

A ZCP, empresa sedeada na Maia, faz parte do grupo Alemão Zollern que iniciou a sua actividade com a fundição de ferro em 1708 e que hoje emprega a nível

internacional cerca de 2800 empregados. Dedica-se não só à tecnologia da fundição, mas também à produção de perfis aço, tecnologia de transmissões e elementos de engenharia mecânica. A unidade Portuguesa dedica-se à fundição de precisão, pelo processo de investment casting, de peças em aço para as indústrias automóvel, aeronáutica e química. A ZCP, na casa mãe, dispõe de experiência acumulada com fornos de indução de media – frequência e sistemas de vácuo para fusão de ligas de níquel para as turbinas da parte quente dos turbocompressores. As responsabilidades da ZCP passam pelo apoio ao projecto e desenvolvimento tecnológico, disponibilização através da casa mãe, de informação e know-how de apoio, interligação com potenciais clientes no sector automóvel e endogeneização das tecnologias para posterior implementação de uma unidade fabril.

1.2.1 – ENQUADRAMENTO DO PROJECTO COMTICAST

Actualmente, os impulsores responsáveis pela compressão do ar nos turbocompressores são fabricados por fundição em moldações de gesso a partir de moldes elastómericos, devido às contra saídas que as peças exibem, figura 1.1.

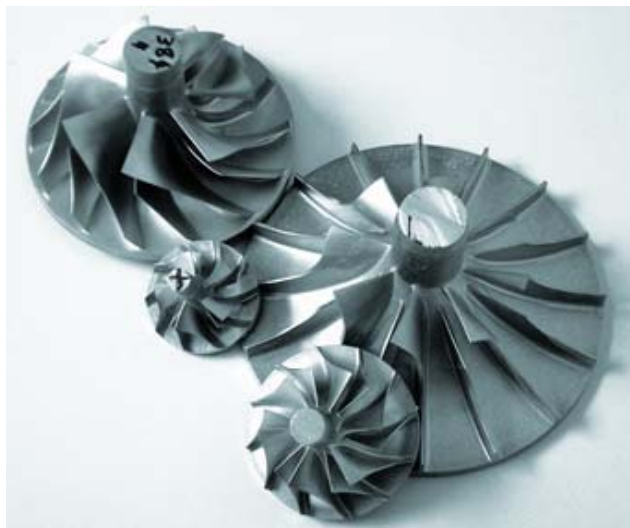



Figura 1.1 - Impulsores em Al para turbocompressores.

Estas peças são quase sempre fundidas em ligas de alumínio, AlSi9Cu2 (AA 354), de alta resistência, tratadas termicamente. Actualmente e em casos excepcionais, estes impulsores são fabricados em ligas de Ti (Ti6Al4V) em centros de maquinagem de 5 eixos e alta velocidade.

A empresa de turbocompressores para motores diesel Holset (www.holset.co.uk), fornecedora exclusiva do fabricante de motores diesel nos E.U.A Cummnis, anuncia desde 1997 no seu sítio na Internet, o fabrico por fundição de precisão destes

impulsores em Ti. A Borgwarner (www.borgwarner.com), empresa que também desenvolve e fabrica turbocompressores (cliente da Zollern GbmH e ZCP), confirmou a utilização da solução Ti6Al4V maquinada para situações particulares em que a vida à fadiga e à fluência deve ser prolongada.

O jornal Metals's Bulletin, especialmente editado no congresso de ligas de Ti em Scotsdalle, Arizona, EUA, 2005, anunciava que em 2010 se vão consumir nos motores diesel nos EUA, 3000 toneladas de impulsores para turbocompressores em ligas de Ti. Ainda segundo a mesma fonte e apoiado por um estudo de 2002 do departamento de energia dos EUA, sobre as oportunidades para o Ti de baixo custo na redução de consumos de Fuel, a solução de impulsores em ligas de Ti, aliada a outros componentes obtidos também em ligas de Ti, poderá garantir o cumprimento da legislação ambiental nos EUA.

Mas de que forma a utilização de ligas de Ti nos turbocompressores ajuda neste problema?

O turbocompressor da figura 1.2 [2], tem múltiplas funções no motor do automóvel, permitindo aumentar a sua potência normalmente em 20 a 40%, o que pode ter consequências inéditas na compactação dos veículos e assim baixar os seus consumos. Outro grande motivo, que talvez em termos de desenvolvimento sustentável é o mais importante, é que permite uma combustão mais limpa com menos emissões. O excesso de oxigénio transportado pelo ar sob pressão, que é comprimido pelo compressor, diminui as emissões de CO_2 e N, e de SO.

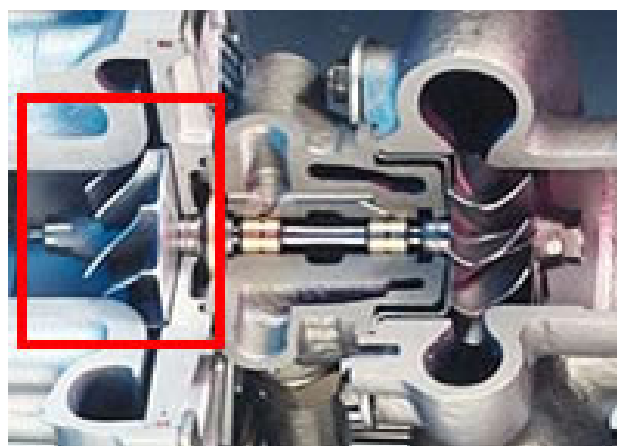



Figura 1.2 - Turbocompressor em corte [3].

Por outro lado, o impulsor do compressor é o ponto fraco de um turbocompressor e todo o seu funcionamento em termos de pressão e caudal de ar, que deve ser maximizado, é limitado por um impulsor em liga de Al. Embora mais denso do que o

Al (2,7), as ligas de Ti (4.5) são tremendamente mais resistentes à fadiga e fluência e apresentam uma excelente relação densidade resistência mecânica.

Actualmente (2008) os preços para impulsores com diâmetros de 65mm e 100mm maquinados rondam os 70€ e 140€, respectivamente. Existem alguns fabricantes nos mercados asiáticos a fornecerem impulsores fundidos com custos de cerca de 60€ para o diâmetro mais pequeno, mas com as geometrias das pás alteradas para poderem ser obtidos pelo processo de cera perdida. Além do mais, e segundo a Holset e Borgwarner, esta geometria não oferece uma boa relação custo/eficácia dos meios de produção para a indústria automóvel. Impõem-se assim que se desenvolvam soluções alternativas [2].

Mas não é só a indústria automóvel que pede processos alternativos de obtenção de peças em ligas de Ti a mais baixo custo. A indústria aeronáutica e aeroespacial, a indústria médica nas aplicações traumatológicas e outros novos mercados mais comuns, como o desporto ou a joalharia, começam a despertar o interesse para este metal com características tão particulares.

1.2.2 - Descrição do Projecto Comticast

O objectivo tecnológico deste projecto é definir, adquirir, modificar e testar alternativas diferentes em termos de moldações e equipamentos de fusão e vazamento que permitam vazar ligas de Ti, em condições de baixa contaminação atmosférica e de cerâmicas, e com temperaturas suficientemente elevadas que facilitem o enchimento destas peças de paredes finas.

Para atingir estes objectivos, previu-se inicialmente a compra de um forno entre as soluções que o mercado dispõe, num investimento de cerca de 1M€. Paralelamente seria utilizado um forno de cadinhos frios no IFIMUP (Instituto de Física e dos Materiais da Universidade do Porto) e seria desenvolvido internamente um forno de plasma ou arco eléctrico. Deste modo conseguia-se cobrir as soluções de cadinhos frios (onde não existe contaminação mas onde os custos dos fornos são mais elevados) e a solução de cadinhos cerâmicos produzidos internamente.

Para o fabrico das moldações bloco e/ou carapaças cerâmicas, basicamente constituídas por materiais refractários correntes mas com peles de contacto com o Ti vazado não reactivas, foram adquiridos diversos tipos de matérias-primas, tais como ligantes, pós e areias refractárias. Estas moldações e cadinhos cerâmicos para além

de não serem reactivas, devem apresentar resistência mecânica, térmica e ao choque térmico suficientemente elevado para resistirem à fusão e ao vazamento.

Outra vertente deste projecto, é como obter a forma dos impulsores dos turbocompressores, uma vez que estes apresentam contra-saídas, sendo esta uma das causas para os seus elevados preços. Actualmente existem algumas soluções para este problema, tais como: moldes com gavetas de movimento curvilíneo [1] ou movimentos axiais e radiais, ou alterar as pás do impulsor para a cera desmoldar. No entanto todas estas soluções são extremamente dispendiosas. Nesta área de actuação, este projecto prevê 2 vias distintas e 1 mista: a obtenção de carapaças cerâmicas pelo processo da cera perdida, as moldações cerâmicas em bloco e a mistura das duas anteriores.

O primeiro é o processo de cera perdida convencional figura 1.3, com recurso a materiais refractários muito estáveis para as primeiras camadas (i.e. com energias livres de formação muito negativas), e as camadas seguintes de cerâmicas mais convencionais que deverão ser suficientemente refractárias, resistentes e permeáveis para se obter a resistência mecânica desejável às elevadas temperaturas de vazamento das ligas de titânio. O segundo processo consiste na obtenção de moldações cerâmicas em bloco a partir de modelos em silicone nos mesmos materiais refractários mencionados, figura 1.3.

Figura 1.3 - Carapaças cerâmicas a secarem após camada de barbotina e pós. Moldações cerâmicas em bloco.

O terceiro processo consiste na mistura dos processos anteriores, ou seja na obtenção de um bloco cerâmico com as primeiras camadas de material refractário muito estável, a construção de um cacho de cera com estes blocos e a posterior obtenção de uma carapaça cerâmica a revestir este blocos em cacho, figura 1.4.

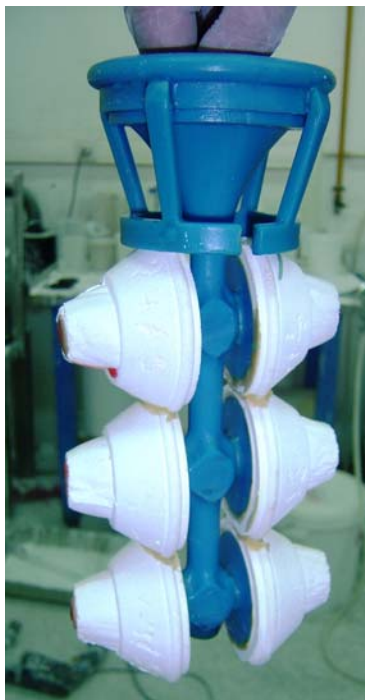



Figura 1.4 - Processo misto de blocos em cacho cerâmico para obtenção de uma carapaça.

Abordadas as problemáticas da fusão e da reactividade, deverá ser agora abordada a questão do vazamento. Este ponto é especialmente importante no que diz respeito ao enchimento das peças, uma vez que os impulsores são peças de paredes finas na zona das pás (0,3mm), sendo necessário garantir que haja um bom enchimento. Para atingir este objectivo, estão previstos testes com recurso a várias técnicas de vazamento tais como: vazamento por gravidade, gravidade assistida por vácuo, em contra gravidade assistida por vácuo e por centrifugação. Resolvido o problema do enchimento de peças com paredes finas, será feita a caracterização química e microestrutural para analisar a eficiência do processo de fabrico.

1.3 – Enquadramento do Projecto

O desenvolvimento proposto inicialmente no projecto COMTICAST obrigava ao investimento de 2M€, investimento este que não era fácil de suportar pelas entidades envolvidas, e como tal foi submetida uma candidatura à ADI (Agência de Inovação) em 2006. Com a reprovação do projecto por parte da ADI, houve necessidade de o reformular, de modo a aproveitar todo o trabalho e investimento financeiro que vinha sendo desenvolvido pelos parceiros no último ano.

Duas das maiores fatias do investimento acima referido eram destinadas, em primeiro à aquisição de um forno, 1 M€ como já tinha sido referido, e em segundo à aquisição de matérias-primas, principalmente cerâmicas. Se no que diz respeito às

matérias-primas, os parceiros avançaram para a sua compra antes da decisão de aprovação do projecto, já no primeiro ponto a tarefa era mais difícil pelo montante que estava envolvido.

As conclusões de todo o trabalho que vinha a ser desenvolvido, em termos de moldações bloco e/ou carapaças, no que diz respeito à reactividade dos materiais cerâmicos utilizados, eram obtidas através de vazamentos no forno de indução por cadinhos frios do IFIMUP. Porém, este forno apresenta a grande limitação de: não permitir a obtenção de impulsores completamente cheios, uma vez que o vazamento é realizado apenas por gravidade. Aliado a este problema estava também o facto do forno não pertencer a nenhum dos parceiros envolvidos neste projecto, o que obrigava sempre a efectuar vazamentos com a autorização, o que retardava consideravelmente o andamento dos trabalhos. Chegou a estar pensado um pedido para efectuar alterações à câmara deste forno para testar a diferença de pressões no enchimento de peças, mas esta hipótese foi inviabilizada por várias questões relacionadas com autorizações e preço do equipamento em causa, e das alterações a efectuar.

Este projecto de desenvolvimento não poderia continuar sem que houvesse autonomia na fusão das ligas de Ti. Assim, e com a experiência já cumulada com um ano de trabalho, quer com o forno de cadinhos frios do IFIMUP, quer com a recuperação de um forno de indução de alta-frequência existente no INEGI, decidiu-se partir para o desenvolvimento de um forno de indução para a fusão e vazamento de ligas de Ti com recurso à técnica de pressões diferenciais.

1.4 – Contribuição desta tese de mestrado

É neste contexto que surge esta tese de mestrado em engenharia mecânica aparece. Este documento descreve o processo de desenvolvimento de um forno de indução para fusão e vazamento de ligas de Ti e outras ligas reactivas, de paredes finas, da ordem dos 0,3 e 0,5mm.

Foi desenvolvido um forno de fusão em cadinhos cerâmicos e vazamento em moldação cerâmica, baseado na técnica de pressões diferencias entre duas câmaras dispostas na vertical. A solução projectada consiste em duas câmaras, uma fixa e numa posição superior (de fusão) e outra móvel e numa posição inferior (de vazamento) que se fecham para a realização do procedimento de fusão e

vazamento. Estas câmaras são separadas uma da outra no interior, por um pequeno disco metálico em Ti designado fusível. O fusível separa fisicamente a zona de fusão, onde está o cadinho com o metal a fundir, da zona de vazamento onde é colocada a moldação cerâmica.

De modo a poder vazar o metal em diferentes moldações, a câmara de vazamento foi dividida numa parte superior permanente e numa parte inferior amovível de acordo com a dimensão da moldação. A câmara de fusão consiste num corpo metálico, com um tubo de quartzo no topo que separa fisicamente o cadinho da bobine de indução. A bobine pode mover-se verticalmente de modo a permitir controlar a indução na fusão do metal em altura.

Com base na experiência adquirida na realização de testes em diferentes fornos de indução, quatro ao todo, foi adquirida uma unidade de potência de 100kW e frequência entre 10 a 40KHz, que permite ajustar os parâmetros de fusão (frequência, corrente e potência) mediante a quantidade e o tipo de metal a fundir. Esta unidade funde 3kg de Ti em menos de 60seg.

O sistema de vácuo foi dimensionado e projectado para limpar as duas câmaras em 30seg, e de modo a permitir o controlo e monitorização da pressão de vácuo individualmente em cada uma delas, facilitando assim o controlo do diferencial de pressões.

O forno de fusão e vazamento desenvolvido apresenta assim algumas soluções inovadoras ao nível deste tipo de aplicações, e que passam por:

- Modularidade de operação do forno;
- Flexibilidade no procedimento de fusão e vazamento;
- Unidade de indução dedicada às necessidades do projecto e maior flexibilidade no ajuste das características de fusão;
- Compactação do sistema quando comparado com outros sistemas existentes no mercado para este tipo de ligas;
- Maior segurança no processo de fusão, por eliminar o possível contacto entra a água de refrigeração da bobine com o metal líquido.

1.5 – Estrutura do trabalho

O presente documento encontra-se dividido em três capítulos de pesquisa (2, 3 e 4) e dois de trabalho experimental (5 e 6), com o seguinte conteúdo:

No Capitulo 2 faz-se o resumo das propriedades das ligas de Ti. O capítulo inicia com um pouco da história deste metal e descreve a metalurgia, propriedades mecânicas, químicas e físicas e a metalurgia.

No Capítulo 3 aborda-se o mercado do Ti e das suas ligas, o consumo, os preços e a sua evolução nos últimos anos e perspectivas de futuro, os principais mercados consumidores e os factores que impedem e/ou favorecem o seu consumo.

No Capítulo 4 descreve-se a fusão das ligas de Ti, as vantagens das peças obtidas por este processo, as diferentes técnicas e sistemas usados, problemas e cuidados associados à fusão destas ligas, regras de segurança e acabamentos.

No Capítulo 5 descreve-se o procedimento de desenvolvimento do produto desde a fase de recolha dos atributos, elaboração das especificações, concepção e desenvolvimento da arquitectura do forno. É apresentada a pesquisa realizada para cada uma das áreas do projecto, e a pesquisa de patentes.

No capítulo 6 descreve-se com detalhe o projecto mecânico do equipamento, no que diz respeito ao dimensionamento, soluções adoptadas, tipo de construção, sistemas auxiliares, sistema de vácuo, e sistema de indução.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões do trabalho. E finalmente no **capítulo 8** faz-se uma proposta para trabalhos futuros.

Bibliografia capítulo 1

[1].David Decker (**2003**), "Method of making turbocharger including cast titanium compressor wheel", Pat. Nº:US 6,904,949 B2, **BorgWarner**.

[2].US Department of Energy (**2002**), "Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles by EHKT Technologies" US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory.

[3].www.Borgwarner.com. (**2008**). *"Turbocharger."*

CAPÍTULO 2

O TITÂNIO E AS SUAS LIGAS

2 – O TITÂNIO E AS SUAS LIGAS

O Ti é o 9º elemento mais abundante da crosta terrestre com 0,6%. É o 4º elemento metálico mais abundante depois do Alumínio (8,1%), Ferro (5.1%) e do Magnésio (2,1%). Contudo, o titânio na forma de metal consome menos de 5% por ano do minério do qual é extraído, sendo a maioria do minério usado como óxido de purificação de pigmentos. É sabido que o uso deste metal tem sido fortemente limitado pelo seu preço e a sua instabilidade, assim como pela falta de um processo de fabrico rentável [18].

Há 50 anos de experiência acumulada com o Ti, quer no projecto de aplicações quer no uso em situações industriais, que suportam a excelência do seu uso. Grande parte desta experiência deve-se às exigências das indústrias da defesa e aeroespacial. O desafio actual desta indústria é agora o de fornecer uma combinação de desempenho e confiança, a preços que vão ao encontro das necessidades e expectativas dos possíveis utilizadores [14, 17].

2.1 - UM POUCO DE HISTÓRIA

A primeira suspeita de um novo e desconhecido elemento presente numa areia ferruginosa, negra e magnética (a Ilmenite) foi relatado em 1791 por Gregor em Cornwall, no Reino Unido. Em 1795, um químico alemão, Klaproth, identificou o mesmo óxido, anteriormente descrito por Gregor, ao analisar rutilo ao qual deu o nome de Titânio.

Foram várias as tentativas efectuadas para isolar o metal do minério através do uso de tetracloreto de titânio ($TiCl_4$) como passo intermédio. É de ter em conta que a produção de $TiCl_4$ existia já antes do interesse no metal de titânio, isto porque era utilizado como stock para a produção de TiO_2 de elevada pureza, utilizado nas tintas.

A produção de titânio de elevada pureza provou ser difícil, devido à sua grande tendência em reagir com o oxigénio e o azoto. Foi já no século 20 (1937 – 1940), que apareceu um processo comercialmente atractivo desenvolvido por Kroll no Luxemburgo. Este processo consistia na redução do tetracloreto de titânio com magnésio numa atmosfera de gás inerte. Este famoso processo de Kroll permaneceu quase inalterável e é o processo dominante para a produção de Titânio nos nossos dias.

O interesse nas propriedades deste novo metal começou logo depois da II Guerra Mundial no final dos anos 40, início dos anos 50. O desenvolvimento da indústria mundial do titânio pode ser caracterizada por duas fases. A primeira, que se situa entre o inicio dos anos 50 até metade dos anos 80, foi dominada pelo progresso tecnológico onde os governos dos EUA, Europa, Rússia e Japão, apostaram na produção em larga escala de esponja de Titânio. Esta fase é também caracterizada pelo aparecimento de novas ligas, estimulada pelo reconhecimento na utilidade da adição de Alumínio para obtenção de ligas de maior resistência. Isto levou ao aparecimento de ligas α, com a adição de Sn, para aplicações de alta temperatura, ligas α + β, com a adição de Mo, para aplicações de alta resistência e ligas β ideais para serem trabalhados a frio ou a quente. Estas ligas tinham uma forte aceitação na indústria aeroespacial que se desenvolvia em toda a sua força bem como na indústria militar.

A segunda fase, que se mantém nos dias de hoje, pode ser caracterizada pela transformação desta indústria numa indústria comercial, onde a tecnologia é importante, mas onde o aspecto económico adquire um papel de relevo [6].

2.2 - Titânio e Ligas de Titânio

Mas o que é que faz do Titânio um metal tão atractivo para engenheiros, arquitectos ou mesmo designers?

O Ti encontrou o seu lugar no mercado devido à reunião de propriedades tais como: densidade (4,5), elevada resistência à corrosão e resistência mecânica (a tensão limite elástico varia entre os 480MPa, para algumas classes de titânio comercial, até 1100MPa para algumas ligas usadas em aplicações estruturais, ou 1725MPa para algumas formas especiais de arames e molas), que lhe dão vantagem sobre materiais concorrentes tais como o alumínio, os aços e as superligas, figura 2.1. A

título de exemplo, a densidade do Ti é cerca de metade da do cobre e do níquel, e aproximadamente 60% da do aço. O alumínio, magnésio e o berílio são os únicos metais base mais leves do que o Titânio, mas nenhum deles consegue atingir as características mecânicas do Titânio (excepto o berílio, no que diz respeito à rigidez) [2, 6].

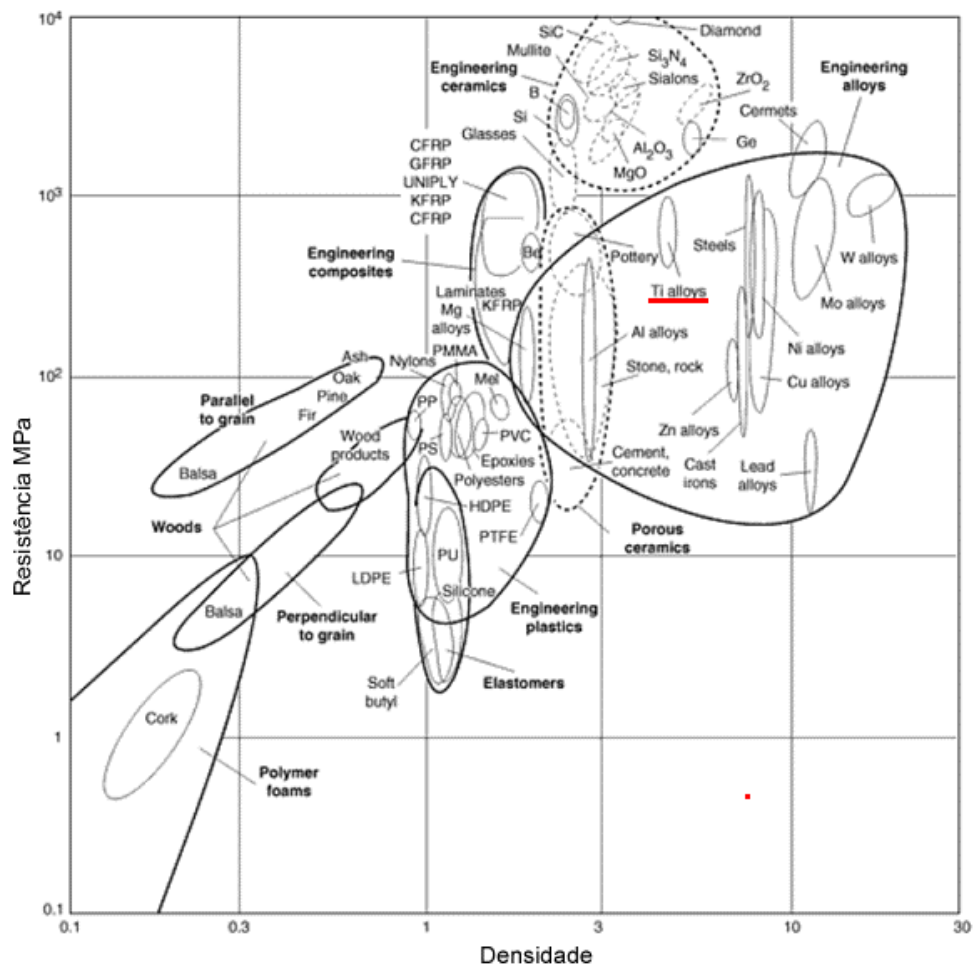



Figura 2.1 - Resistência em função da densidade para vários materiais de engenharia [12]. Tensão limite elástico para metais e polímeros, tensão à compressão para cerâmicos, tensão de corte para os elastómeros e resistência de tracção para compósitos.

Existem ainda mais alguns factos ou benefícios importantes oferecidos pelas ligas de titânio que justificam o porquê de um uso tão alargado:

- A excelente relação densidade/ propriedades mecânicas;
- A resistência à tracção nas ligas de Ti pode ser comparada à do aço inox martensitíco de baixa resistência e é melhor do que os aços inoxidáveis austenitico e ferriticos;
- As ligas comerciais de Ti são úteis para aplicações a temperaturas entre os 538ºC e 595ºC, dependendo da sua composição. Algumas ligas (aluminetos de titânio) têm bons desempenhos a temperaturas superiores;

- O Ti e as suas ligas têm excelente resistência à corrosão. Excedem em vários casos a resistência dos aços inoxidáveis, e têm uma bem conhecida compatibilidade com o corpo humano;
- Algumas destas ligas são aplicáveis para situações de temperatura de sub - zero ou criogénicas;
- O Ti é facilmente personalizável através da adição de outras ligas e da manipulação estrutural que pode ser realizado para o melhoramento da performance em várias aplicações;
- Baixo coeficiente de dilatação térmica que promove a compatibilidade com os processos de reforço com fibras de carbono;
- Características menos relevantes mas que contudo o tornam um metal de grande utilidade como o são as suas propriedades não magnéticas, baixa condução térmica e eléctrica, não toxicidade e a sua afinidade com o hidrogénio (p.e. para aplicações de armazenamento e transporte de Hidrogénio);
- Pode ser forjado e trabalhado pelas técnicas normalmente utilizadas;
- Pode ser usado na fundição, com o *investment casting* como técnica preferida. (de uma forma geral os produtos de Ti obtidos por *investment casting* têm um preço inferior aos obtidos pelos processos convencionais);
- Pode ser processado sob a forma de metalurgia dos pós (o custo do pó de titânio pode ser mais elevado, contudo o processamento com recurso a estas técnicas pode oferecer melhorias nas propriedades e no processamento, bem como uma potencial redução de custos);
- O titânio pode ser ligado por fusão, soldadura e brasagem, adesivos, soldadura por sistemas mecânicos;
- Produtos de Ti podem ser obtidos por maquinagem e conformação desde que sejam tomadas as devidas precauções;
- É possível encontrar titânio como matéria-prima em variados tipos e formas [2, 14].

A indústria aeroespacial e militar foram as grandes responsáveis pelo aumento do uso deste material e das suas ligas em vários tipos de aplicações que passam desde as aplicações estruturais até a componentes para motores. As ligas de Ti tiveram

tanto sucesso neste tipo de aplicações, que outras de outros tipos ficaram por explorar sendo que algumas delas só recentemente começaram a ser investigadas, e desenvolvidas. Outras ainda começaram apenas agora a usar quantidades mais significativas destas ligas, tais como:

Aplicações onde são usadas pela sua resistência à corrosão, tal como a indústria química, água potável e dessalinização, a industria da celulose e do papel, aplicações marítimas e produção e armazenamento de energia;

Aplicações biomédicas que tiram partido da bio-compatibilidade com o corpo humano, para o seu uso em implantes e próteses;

Aplicações especiais que exploram propriedades únicas como a supercondutividade (quando ligado com Nióbio) e o efeito de memória de forma (quando ligado com Níquel);

Novas áreas de aplicação onde a elevada resistência especifica do metal é importante, com acontece na industria automóvel;

Aplicações de uso mais comum que vão desde a joalharia até instrumentos musicais ou equipamento de desporto.

2.2.1 - ESTRUTURA CRISTALINA

O Ti puro apresenta duas estruturas cristalinas elementares: cúbica de corpo centrado (CCC) e hexagonal compacta (HC). Aos 882ºC ocorre a mudança alotrópica de fase da estrutura HC (fase α), normal a baixas temperaturas, para a estrutura de cúbica de corpo centrado (fase β), existente a altas temperaturas. Esta temperatura de transformação pode ser alterada em função da quantidade e do tipo de impurezas ou da adição de outros elementos de liga. A existência destas duas estruturas cristalinas e das correspondentes temperaturas de transformação alotrópica são de extrema importância, uma vez que são a base da vasta variedade de propriedades que o Ti e as suas ligas apresentam, figura 2.2.

Assim abaixo da temperatura de transformação da fase alfa (α), a liga é toda α, acima da temperatura de transformação da fase β, a liga é completamente beta (β), e entre estas temperaturas ambas as fases (α e β) estão presentes.

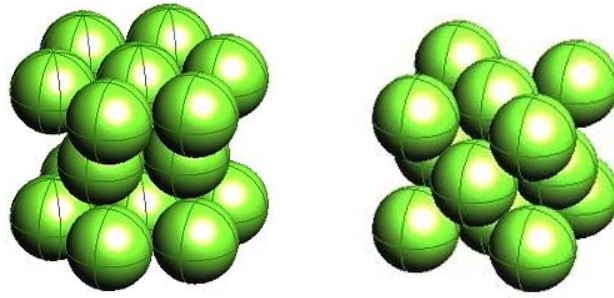



Figura 2.2 - Estrutura hexagonal compacta da fase α e estrutura cúbica de corpo centrado da fase β.

É por isso comum separar as ligas de Ti em quatro categorias:

- alfa (α),
- quase – alfa (ou também conhecidas como superalfa),
- alfa – beta, a liga de Ti mais famosa é deste tipo, figura 2.3;
- beta (β).

Por vezes a categoria quase – beta é também considerada.

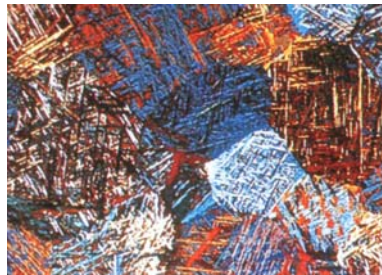



Figura 2.3 - Ti 6Al4V (liga alfa – beta) [9].

Estas categorias representam a origem das microestruturas que podemos encontrar nas ligas após o seu processamento figura 2.4. O Ti é por isso um elemento alotrópico.

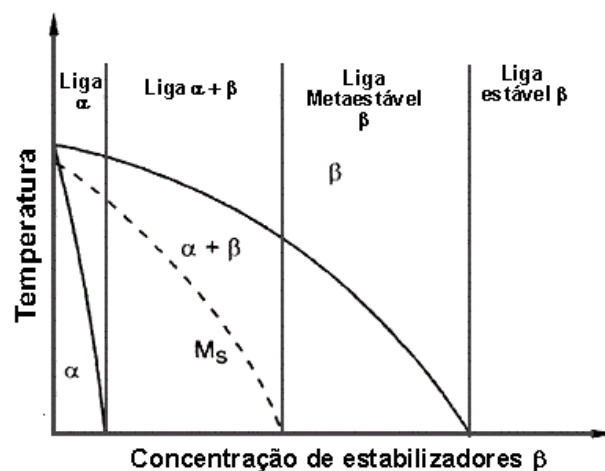



Figura 2.4 - Diagrama de fases do Titânio [6].

O Ti puro à temperatura ambiente é uma estrutura tipicamente 100% alfa (α). Com a adição de elementos de liga conseguem-se obter um vasto leque de microestruturas alternativas para as ligas de Ti.

2.2.2 - EFEITO DA ADIÇÃO DE OUTROS ELEMENTOS

As adições de elementos de liga no Ti são geralmente classificadas como sendo adições estabilizadoras das fases α ou β dependendo se aumentam ou diminuem a temperatura de transformação de 882ºC do Ti puro.

O alumínio, um estabilizador da fase α, é o elemento de liga mais usado nas ligas de Ti, porque é o único metal comum que aumenta a temperatura de transição e tem grande solubilidade em ambas as fases α e β, figura 2.5.

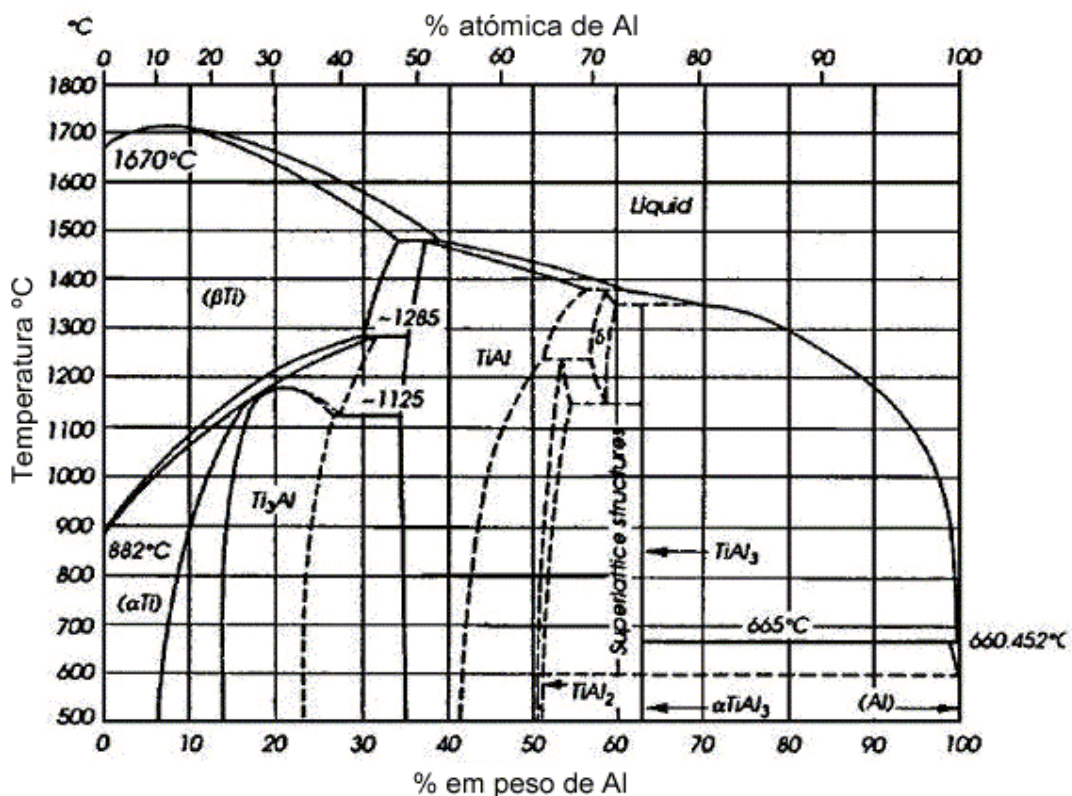



Figura 2.5 - Diagrama de equilíbrio de fases do sistema TiAl [6].

O oxigénio tem especial importância, e apenas nestes casos é considerado como elemento de liga, quando é usado em diferentes quantidades para se obter diferentes graus de resistência mecânica, principalmente nos vários graus de Ti comercialmente puro. Outros estabilizadores desta fase α incluem o boro (B), gálio (Ga), o germânio (Ge) e alguns elementos do grupo das terras raras, mas a sua

solubilidade é muito menor do que a do alumínio ou o oxigénio e nenhum deles é usado comummente como um elemento de liga.

Os elementos estabilizadores da fase β são divididos em dois grupos: elementos isomorfos β e elementos formadores de fase β eutectóide. Os elementos isomorfos β mais usados no Ti são o vanádio (V), molibdénio (Mo) e o nióbio (Nb). Com concentrações suficientes destes elementos consegue-se estabilizar a fase β à temperatura ambiente. Outros elementos pertencentes a este grupo e que raramente são usados devido a questões relacionadas com a densidade são o tântalo (Ta) e o rênio (Re). Dos elementos formadores de fase β eutectóide, os mais usados são o crómio (Cr), ferro (Fe) e o silício (Si) enquanto que os elementos como níquel (Ni), cobre (Cu), Manganês (Mn), tungsténio (W), paládio (Pd) e bismuto (Bi) têm um uso limitado, sendo apenas aplicado numa ou duas ligas para fins específicos. Existem ainda outros elementos pertencentes a este grupo mas que não são usados na obtenção de ligas de Ti, tais como cobalto (Co), prata (Ag) ou ouro (Au). O hidrogénio (H) pertence também a este grupo, a baixa temperatura eutectóide (300ºC) aliada à elevada capacidade de difusão do H no Ti conduzem a um processo especial de refinamento da microestrutura chamado Hidrogenação/Desidrogenação. O teor máximo de H usado quer no Ti puro quer nas suas ligas está limitado a cerca de 125 - 150 ppm devido ao fenómeno de fragilização pelo hidrogénio [6]. A figura 2.6 mostra o efeito da adição destes elementos no diagrama de fases das ligas de Titânio.

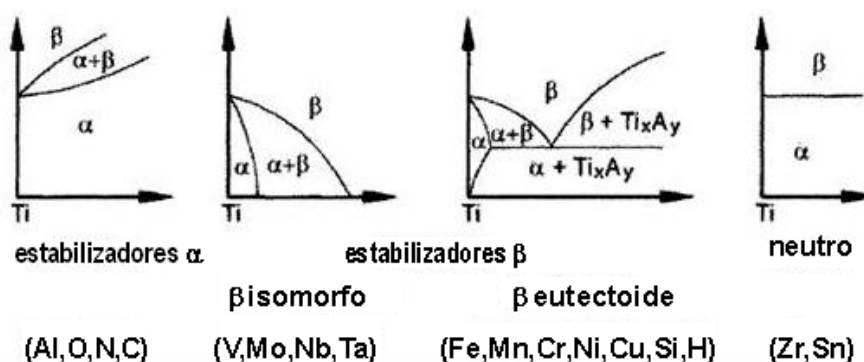



Figura 2.6 - Efeito da adição de elementos de liga nos diagramas de fase das ligas de Titânio [6].

Na figura 2.7, pode ser observado o efeito da adição de elementos de liga no microestrutura, e em algumas propriedades representativas de cada uma dessas estruturas.

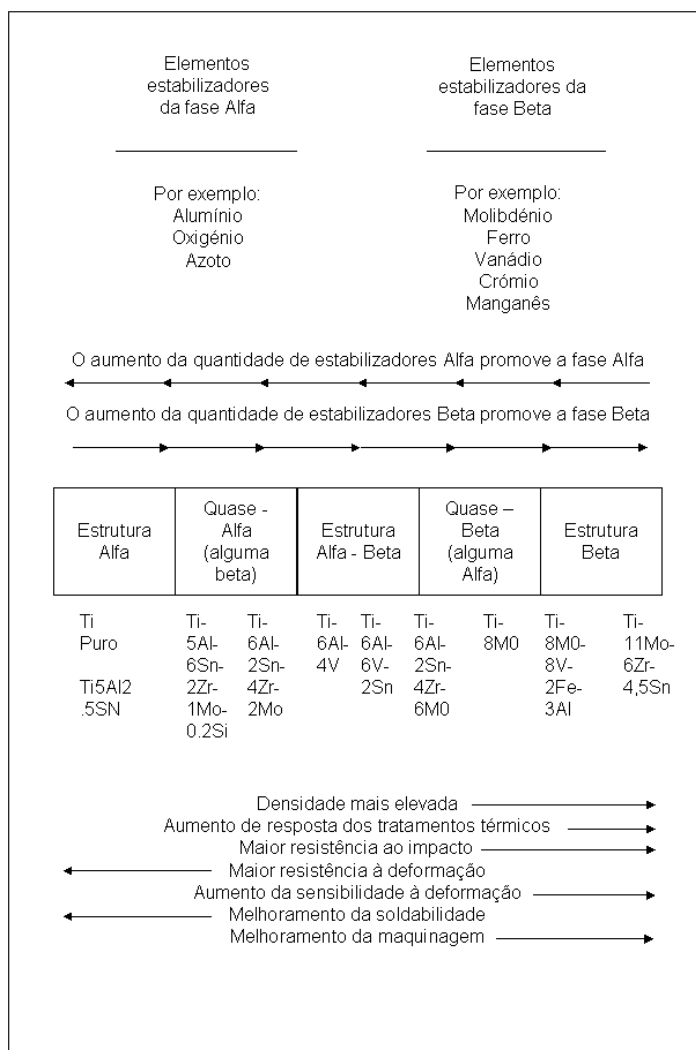



Figura 2.7 - Esquema sobre o efeito de diferentes elementos da liga na estrutura final e nalgumas propriedades de diferentes ligas [14].

2.2.3 - TITÂNIO PURO

O Ti puro, geralmente conhecido como Ti comercialmente puro, é a versão do metal menos resistente mecânicamente mas o mais resistente no que diz respeito à corrosão. A principal diferença entre as diferentes classes de Ti puro existentes está nas concentrações de oxigénio, ferro e azoto.

O titânio puro tira partido do endurecimento intersticial do oxigénio e do efeito da adição de pequenas quantidades de outros elementos (p.e. ferro e paládio), fazendo com que as várias classe do metal consigam ajustar-se a várias aplicações. As classes de mais elevada pureza (com menos intersticiais) são menos duras e resistentes, mais dúcteis e têm uma temperatura de transformação mais baixa do que as classes com mais intersticiais.

O Ti comercialmente puro é escolhido pela sua excelente resistência à corrosão, especialmente em aplicações onde não são necessárias elevadas resistências [5, 11, 14].

2.2.4 - LIGAS ALFA E QUASE-ALFA

A principal diferença entre estas ligas e o Ti comercialmente puro reside na quantidade de oxigénio.

As ligas α são caracterizadas por uma satisfatória resistência mecânica, dureza, resistência à deformação plástica, excelente comportamento à corrosão, boa soldabilidade e por uma fraca capacidade para serem forjadas, que resulta numa grande tendência para defeitos de forjamento tais como fissuras superficiais e rugas, o que obriga a pequenos passos no seu forjamento e frequentes reaquecimentos entre eles.

As características destas ligas, não podem ser melhoradas por tratamentos térmicos, devido à limitada transformação de fase sob as condições normais destes tratamentos (a estrutura mantém-se toda alfa ou quase toda alfa). Estas ligas são muitas vezes usadas no estado recristalizado ou recozido de modo a eliminar as tensões residuais resultantes do seu processamento.

Estas ligas têm geralmente resistência à deformação plástica mais elevada do que as ligas β e são as preferidas quando se trata de aplicações a elevadas temperaturas. A inexistência de uma fase de transição dúctil – frágil, uma característica das ligas beta, torna-as também ideias para aplicações criogénicas.

Como uma das ligas de titânio mais antigas, ganhou grande aceitabilidade nas aplicações a baixa temperatura, reservatórios para hidrogénio e aplicações navais. São principalmente usadas na indústria química.

As ligas quase-alfa ou superalfa são obtidas através da introdução de alguns elementos estabilizadores da fase β (menos de 10% destes elementos). Nestas ligas já se obtêm alguns efeitos com os tratamentos térmicos [5, 11, 14]

2.2.5 - LIGAS ALFA + BETA

Tal como o nome indica, estas ligas têm uma composição à base das fases α e β. Contêm um ou mais elementos estabilizadores α (p.e. alumínio) ou elementos solúveis α e um ou mais elementos estabilizadores da fase β (p.e. vanádio e

molibdénio), em concentrações que podem ir dos 10% aos 50% à temperatura ambiente.

A formação de uma estrutura β completa, ou não, permite que estas ligas sejam tratadas termicamente (excedendo a temperatura de transição β ou produzindo uma quantidade significativa de fase β para subsequente transformação), envelhecidas (aquecidas para produzir ainda mais mudanças na fase β - martensites e fase α acicular), controlando assim as suas propriedades. O facto de terem duas fases presentes permite que a sua estrutura seja refinada, e por permitirem a retenção temporária de alguma fase β a baixa temperatura, permitem um óptimo controlo da microestrutura durante a fase de envelhecimento.

As ligas α + β em geral têm alguma facilidade em ser trabalhadas, podendo ser obtidos produtos por quase todos os processos de fabrico. O facto de poderem ser tratadas termicamente, pode-lhes garantir excelentes combinações de resistência e ductilidade. Estas ligas são mais resistentes do que as ligas α ou as ligas β.

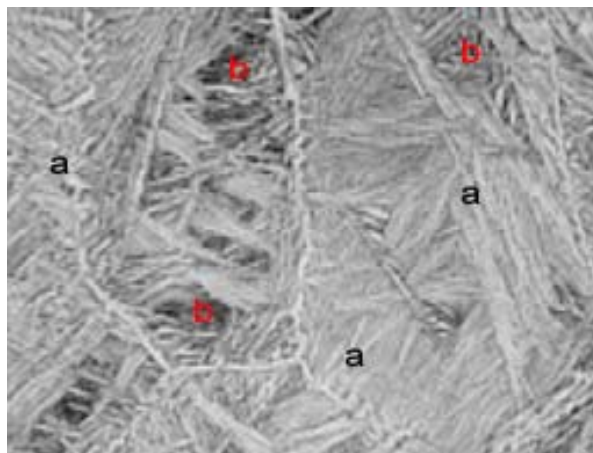



Figura 2.8 - Ti6Al4V obtido por fundição. A estrutura consiste em fase β (b) transformada que contém α acicular (a) [9].

A liga α+β mais comum e a mais utilizada é a Ti6Al4V, que é contudo, um pouco difícil de trabalhar a frio [4, 5, 11, 14] Esta é também a liga que está a ser utilizada no projecto de desenvolvimento COMTICAST.

2.2.7 - LIGAS BETA METAESTÁVEL

As ligas de Titânio β são a classe mais versátil de entre as ligas de Titânio. Conseguem oferecer uma excelente relação resistência/ peso, bem como uma atractiva combinação entre resistência, dureza e resistência à fadiga. Um dos

factores preponderantes na utilização destas ligas tem sido a sua excelente forjabilidade e sua formabilidade a frio.

Algumas das suas desvantagens relativamente às ligas α + β, são a densidade mais elevada, tensão de cedência mais baixa, leque menos alargado de possibilidades no que diz respeito a técnicas de transformação e custo mais elevado

No geral, estas ligas de titânio colmatam a elevada necessidade que existe de componentes de titânio para aplicações a temperatura moderada [5, 11, 14].

2.3 – TRANSFORMAÇÕES DE FASE E FORMAÇÃO DE FASES SECUNDÁRIAS

2.3.1 – TRANSFORMAÇÃO DE FASE

Quando ocorre a transformação da fase β (CCC) para a fase α (HC) tanto no Ti puro como nas suas ligas, esta pode ocorrer através de um processo de crescimento por difusão e nucleação controlada e moderadamente rápida ou pode ser através de um processo de transformação martensitica muito rápido.

2.3.1.1 – Transformação Martensitica

A transformação martensitica envolve o movimento cooperativo de átomos por um processo do tipo corte ou cisalhamento de onde resulta uma transformação microscópicamente homogénea de uma estrutura CCC numa estrutura HC. Esta martensite hexagonal (mais conhecida como α primária) é designada como α' e pode ser observada segundo duas morfologias: martensite massiva (ou martensite fechada que ocorre no Ti puro) e martensite acicular (que ocorre em ligas com elevado conteúdo de solutos).

Com o aumento da quantidade de soluto a martensite hexagonal torna-se distorcida e do ponto de vista cristalográfico a estrutura cristalina perde a sua simetria hexagonal, devendo ser descrita como ortorrômbica (mais conhecida como α primária dupla), e que é designada como α''.

Quer a martensite primária (α') como a primária dupla (α'') aparecem devido ao arrefecimento rápido e são decompostas em fase α e fase β através de um tratamento de envelhecimento. A temperatura de início da martensite (Ms) no Ti puro depende do grau de impurezas (oxigénio e ferro), mas situa-se à volta dos 850ºC, e aumenta com o aumento do teor de estabilizadores α, (alumínio o oxigénio), e

diminui com o aumento do teor de estabilizadores β. A taxa de arrefecimento desempenha um papel importantíssimo na criação de fases martensiticas [6, 11, 14].

2.3.1.2 – Crescimento por Difusão e Nucleação

Quando as ligas de Ti são arrefecidas a velocidades suficientemente baixas desde a zona da fase β até à zona da fase α+β, a nucleação da fase α, que é incoerente em relação à fase β, acontece primeiro nas juntas de grão β conduzindo a uma camada mais ou menos continua ao longo destas juntas de grão. Durante o posterior arrefecimento, ocorre a nucleação de placas α na interface da camada α contínua ou na própria junta de grão β, crescendo em direcção aos grãos β sob a forma de placas paralelas. Estas placas continuam a crescer para o interior dos grãos β até encontrarem outras colónias α nucleadas noutras juntas de grão β. As placas individuais α são separadas no centro das colónias α por matrizes β retidas, intituladas placas β, formando uma estrutura lamelar α e β [6, 11, 14].

2.3.2 – Formação de fases secundárias

Compostos intermetálicos e fases secundárias transientes são formados nas ligas de Ti juntamente com as tradicionais variantes α e β da microestrutura. As fases secundárias mais importantes que têm sido indicadas são as fases Ómega (Ω) e Alfa-2 (esta quimicamente escrita como Ti_3Al) [14].

A fase Omega ainda não provou ser um factor de relevo nos sistemas comerciais actuais. Esta é uma fase sub-microscópica, sem equilíbrio, que se forma como um produto de crescimento por nucleação. Muitas vezes tido como sendo uma fase de transição que aparece durante a normal transformação de β para α. Aparece nas ligas β metaestáveis e pode conduzir a uma forte fragilização da liga. Tipicamente aparece durante o envelhecimento a baixas temperaturas, mas também pode ser induzida por elevadas pressões hidrostáticas.

A fase Alfa-2 é uma fase ordenada que se forma dentro da fase α nas ligas que contêm mais de 6%Al. A reacção é promovida pelo aumento de oxigénio. Esta fase tem sido considerada como uma preocupação em alguns casos de fractura por corrosão [9, 14].

2.3.3 – TIPOS DE MICROESTRUTURA NAS LIGAS DE TI

As ligas de Ti, tal como foi visto anteriormente, apresentam uma gama variada de transformações microestruturais. A morfologia (forma/localização) das fases varia com os tratamentos a que foram previamente submetidas estas ligas. Um exemplo pode ser visto na figura 2.9.

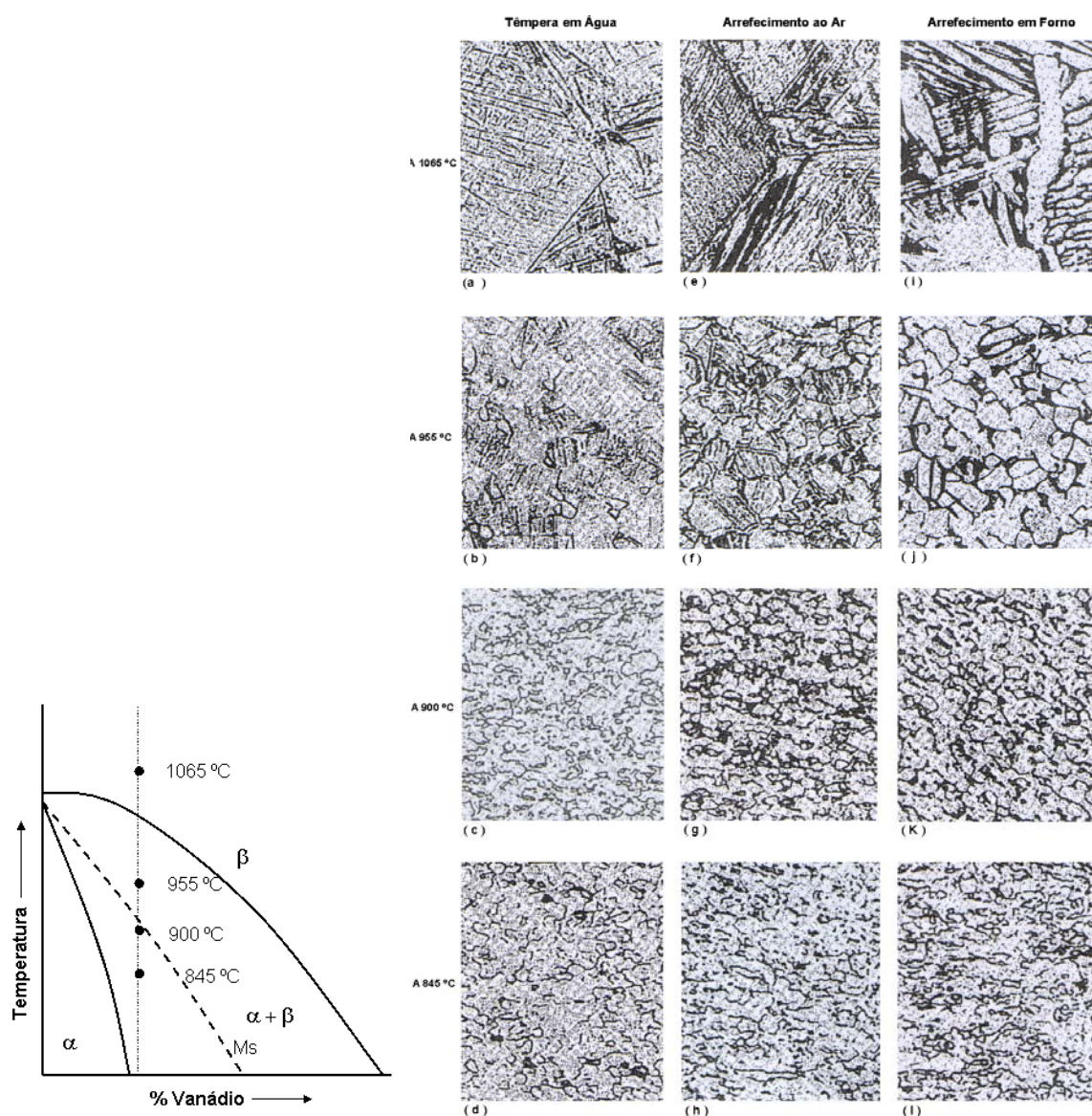



Figura 2.9 - Efeito do arrefecimento na microestrutura de uma liga α + β (Ti6Al4V), (a) α' + β, juntas de grão β, (b) e (c) α primário e α' + β, (d) α primário e β metaestável, (e) α + β acicular; juntas de grão β, (f) α primário e α + β acicular, (g) α primário e α + β acicular. (h) α primário e β, (i) placas α+β, (j) α equiaxial e β intragranular, (k) α equiaxial e β intragranular., (l) α equiaxial e β intragranular [14].

A fase α presente na altura do arrefecimento (α primária) pode permanecer relativamente globular (equiaxial), mas a fase β transformada (martensite ou α) pode ser muito acircular ou alongada. A quantidade de α equiaxial e o aspecto mais fino ou mais grosseiro dos produtos β transformados afectam as propriedades das ligas de Ti.

A fase β metaestável pode apresentar mais variedade na decomposição do que as estruturas super saturadas α ou estruturas martensiticas α. A fase Omega pode ser formada a partir da fase β, tal como pode a fase α e a fase β de baixo teor de solutos. Outros compostos intermetálicos podem ser formados, e mediante certas circunstâncias, o arranjo da fase β pode também acontecer.

2.4 - PROPRIEDADES DO TITÂNIO E DAS SUAS LIGAS

As propriedades das ligas de Ti são determinadas pela morfologia, fracção volúmica e propriedades individuais das suas duas fases α e β. Comparando com a fase β, a fase α é caracterizada da seguinte maneira :

- Resistência à deformação plástica mais elevada;
- Ductilidade mais baixa;
- Resistência à rotura mais elevada;
- Propriedades físicas e mecânicas anisotrópicas;
- Taxa de difusão atómica duas vezes mais baixa;

Devem ser ainda considerados dois processos diferentes que ajudam na definição das propriedades do Ti quer sejam combinados ou de forma isolada: as propriedades químicas e físicas que resultam da adição de elementos de liga e as propriedades da microestrutura resultantes dos tratamentos térmicos e/ou os processos de obtenção (maquinagem, fusão e metalurgia dos pós) que muitas vezes utilizam calor ou são precedidos de tratamentos. Mais recentemente surgiu uma terceira opção: a produção de materiais compósitos [13, 14].

Para a grande parte das aplicações das ligas de Ti, as propriedades físicas e químicas têm menor peso na sua escolha, do que as propriedades mecânicas, tabela 2.1. A excepção é para a densidade e para a excelente resistência à corrosão, devido à capacidade do Ti tem em formar uma fina camada de oxido superficial.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas do Ti elementar [14]

Propriedades	Descrição ou Valor
Número atómico	22
Peso atómico	47.49
Volume atómico	10.6 W/D
Raio covalente	1.32 Å
Potencial de ionização	6.8282 V
Estrutura cristalina	
alfa (≤ 882.5 ºC)	Hexagonal compacta
beta (≥882.5 ºC)	Cúbica de corpo centrado
Cor	Cinzento escuro
Densidade	4.51 g/cm^3
Ponto de fusão	1668 ± 10ºC
Sólido/líquido	1725 ºC
Ponto de ebulição	3260 ºC
Calor especifico (a 25ºC)	0.5223 kJ/kg.K
Condutividade térmica	11.4 W/m.K
Calor de fusão	440 kJ/kg (estimado)
Calor de vaporização	9.83 MJ/kg
Gravidade especifica	4.5
Dureza	70 a 74 HRB
Resistência à tracção	240 MPa
Módulo de young	120 GPa
Coeficiente de poisson	0.361
Coeficiente de fricção	
a 40 m/min	0.8
a 300 m/min	0.68
Coeficiente de expansão térmica linear	8.41 μm/m.k
Condutividade eléctrica	3%IACS (Cobre = 100% IACS)
Resistividade eléctrica (a 20ºC)	420 ηΩ.m
Electronegatividade	1.5 Pauling's
Coeficiente térmico de resistência eléctrica	0.0026/ºC
Susceptibilidade magnética (volume, à temperatura ambiente)	180 (±1.7)x10e^{-6} mks

A adição de elementos de liga continua a ser a base do aumento da resistência mecânica, permite a geração de estruturas ordenadas (p.e. compostos inter metálicos de aluminetos de titânio), é responsável pela maioria das propriedades físicas (p.e. densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de expansão térmica) e controla a resistência química do material (corrosão e oxidação) [14].

A produção de materiais compósito, vai para além dos limites da metalurgia, e utiliza a mistura de diferentes materiais para criar um compósito com desempenho superior.

As propriedades do novo composto dependem directamente das propriedades dos materiais que o constituem. No caso das ligas de Ti e dos titanatos, são usadas

fibras ou partículas para os tornar mais resistentes e formarem entre eles um compósito de matriz metálica [13, 14].

A tabela 2.2 apresenta a comparação entre algumas das principais propriedades da liga de Ti mais utilizada com as mesmas propriedades de outros metais concorrentes.

Tabela 2.2 - Comparação de algumas características da liga mais representativa de Ti com outros materiais metálicos [6]

	Ti Ti-6Al-4V	Fe	Al	Ni	Mg	Aço Inox 430
Temperatura de fusão (ºC)	1670	1538	660	1455	649	1500
Temp. de Transformação Alotrópica (ºC)	β 882 α	γ 912 α	-	-	-	910-1400
Estrutura Cristalina	ccc---Hc	cfc---ccc	cfc	cfc	Hc	ccc-cfc-ccc
Módulo de Elasticidade (Temp. Amb.)(GPa)	115	215	72	200	44	200
Tensão Limite Elástico (MPa)	1000	1000	500	1000	105	609
Densidade (g/cm^3)	4.5	7.9	2.7	8.9	1.74	7.85
Resistência à Corrosão	Mt Alta	Baixa	Elevada	Média	Elevada	Elevada
Reactividade com o Oxigénio	Mt Alta	Baixa	Elevada	baixa	Elevada	Baixa
Coeficiente de Expansão Térmica(10^{-6} mK^{-1})	9.0	11.8	23.1	13.4	26	10.8
Condutividade Térmica($Wm^{-1}K^{-1}$)	20	80	237	90	157	22
Calor específico ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	523	450	900	440	971	461
Resistividade Eléctrica (μΩ m)	0.42	0.42	0.03	0.07	0.46	0.25
Preço do metal	Mt Alto	Baixo	Médio	Elevada	Elevado	Médio

2.4.1 - RESISTÊNCIA

De entre os materiais metálicos, apenas os aços de alta resistência têm uma resistência específica mais elevada do que o Ti. Os valores da tensão de cedência para as ligas convencionais de Titânio variam entre 800 – 1200 MPa, sendo as ligas de fase β metaestável as que apresentam os valores mais elevados.

Os três métodos supra referidos, adição de elementos de liga, processamento e compósitos, podem ser utilizados com o objectivo de aumentar a resistência. A adição de elementos de ligas por si só, tem sido menos utilizado com este fim actualmnete. Contudo um dos casos onde isso acontece, é a liga Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al (comercializada pela TIMET sob o nome de Timetal 125) que foi especialmente desenvolvida para parafusos para aplicações de alta resistência.

Os valores de resistência mecânica estão entre os mais elevados para as ligas convencionais de Ti e podem ir até aos 1800MPa como é o caso das ligas intermetálicas Ti_3Al “Super alfa 2”.

Estes elevados valores de resistência, são apenas superados pelos compósitos de matriz de titânio. Como exemplo, temos a liga Ti6Al4V reforçada com fibras de SiC (carboneto de silício), que com uma relação volúmica de 35% de fibra pode facilmente atingir valores de cerca de 2000 MPa de resistência à tracção na direcção da fibra [6, 13].

2.4.2 - RIGIDEZ

A rigidez de um material é representada pelo seu Módulo de Young. Este valor está directamente relacionado com as ligações atómicas na malha cristalina e aumenta com o aumento do grau de organização da malha.

A adição de alumínio nas ligas de Ti, provoca um aumento do Módulo de Young devido às alterações que provoca na estrutura destas ligas. Também os métodos de processamento podem influenciar a sua rigidez. O carácter anisotrópico da estrutura cristalina hexagonal da fase α, tem uma grande influência nas propriedades elásticas do Ti e das suas ligas. Por exemplo, o módulo de Young e o módulo de rigidez de estruturas monocristalinas de fase α a temperatura ambiente variam fortemente com a direcção da carga aplicada. Esta variação torna-se menos evidente para estruturas policristalinas com textura cristalografica figura 2.10 [6].

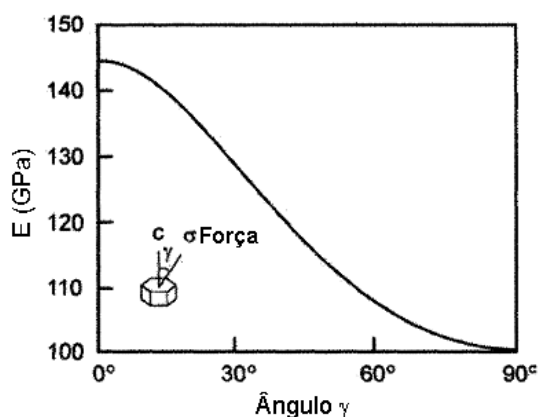



Figura 2.10 - Módulo de elasticidade de mono cristais de Titânio α em função do ângulo γ de aplicação da carga [6].

De um modo geral tanto o módulo de Young como o módulo e rigidez diminuem com o aumento de temperatura, sendo este efeito mais pronunciado nas estruturas policristalinas sem fase α. Em geral o módulo de Young das ligas de Ti β é menor do que o das ligas α e ligas α + β.

Tal como a resistência, também a rigidez dos materiais compósitos de matriz em ligas de Titânio aumenta com o aumento da fracção volúmica de fibras usadas. O

uso de 30 a 35% de volume de fibras de SiC (carboneto de silício) duplica a rigidez do compósito quando comparado com um matriz metálica não reforçada [6, 13].

2.4.3 - DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

A deformação plástica das ligas de Ti pode dever-se a dois processos:

- Deformação por escorregamento de planos atómicos;
- Deformação por maclagem.

Se o primeiro destes processos é comum em todos os metais e resulta das forças de corte ou cisalhamento, o segundo é um processo exclusivo de alguns metais e que se manifesta no Ti devido à sua estrutura HC [4].

O comportamento dúctil da fase α do Ti, especialmente a baixas temperaturas, resulta da activação do processo de deformação por maclagem em adição ao processo de escorregamento. Os processos de deformação por maclagem são especialmente importantes no comportamento do Ti puro e de algumas das suas ligas. Este processo é praticamente suprimido nas ligas α + β devido às pequenas dimensões de ambas as fases, ao alto conteúdo de solutos e à presença de precipitados de Ti_3Al [6].

Na fase β (CCC) também pode acontecer deformação por maclagem para além da deformação por deslizamento, mas a ocorrência de maclagem nas ligas β é limitada ao estado monofásico e diminui com o aumento de solutos nas ligas. A deformação por maclagem é completamente eliminada nas ligas β que são sujeitas a tratamentos térmicos onde ocorre o endurecimento por precipitação ou endurecimento estrutural. [6]

A ductilidade aumenta da estrutura HC para a estrutura CCC. Geralmente o número de sistemas de deslizamento – que é igual ao número de oportunidades de deslizamento na malha cristalina – é de apenas 3 para a estrutura HC enquanto para a estrutura CCC é de 8.

2.4.4 – CORROSÃO E OXIDAÇÃO

O Ti e as suas ligas oferecem boa resistência à corrosão, figura 2.11, quando sujeitas a atmosferas ligeiramente redutoras até atmosferas altamente oxidantes. Estas ligas para além de serem mais resistentes do que o aço inox em muitos

ambientes industriais, apresentam também excelente resistência à corrosão atmosférica em ambientes marinhos e industriais e a sua utilização na indústria química tem vindo a crescer gradualmente.

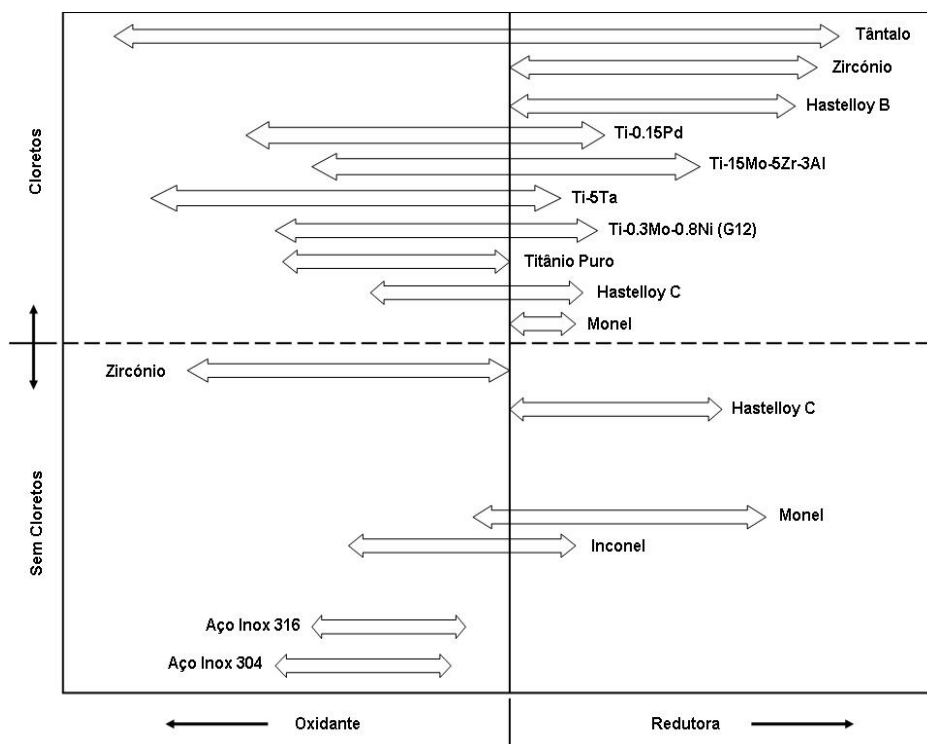



Figura 2.11 – Comparação da resistência à corrosão entre algumas ligas de Ti e outros metais [14].

A excelente resistência à corrosão apresentada pelas ligas de Ti, resulta da formação de uma camada de óxido protectora na superfície, muito estável, contínua, não porosa e muito aderente. Devido ao Ti ser altamente reactivo e ter uma afinidade extremamente elevada com o oxigénio, esta camada forma-se espontaneamente e instantaneamente quando as superfícies do metal são expostas ao ar e/ou misturas de gases. De facto, se uma zona desta camada for danificada, ela imediatamente se refaz desde que haja a presença de oxigénio ou água no meio em que está inserida. A natureza, composição e espessura desta camada de óxido, depende das condições ambientais, sendo basicamente constituída por TiO_2, e de espessura inferior a 10nm, a qual é invisível ao olho humano.

Por outro lado, esta resistência à corrosão do Ti e das suas ligas desaparece em atmosferas completamente redutoras ou extremamente oxidantes, onde a natureza protectora desta camada desaparece. Contudo, em muitos dos ambientes redutores comerciais, a estabilidade e integridade desta camada, pode ser melhorada através da adição de inibidores (agentes oxidantes) a essa atmosfera [11].

O Ti puro, de um modo, geral é mais resistente à corrosão do que as ligas de Ti, porém nas ligas α + β e nas ligas β, pode geralmente observar-se resistências similares. A resistência à corrosão no Ti puro pode ainda ser melhorada através da adição de pequenas quantidades de metais nobres, tais como Pd, Mo ou Ni. A resistência à corrosão das ligas de Ti de maior resistência mecânica α+β e β, são excepcionalmente beneficiadas pela inclusão de teores superiores a 3% de Mo e 8% de Zr. A adição de vanádio é de menor importância, enquanto que a inclusão de níveis superiores a 3% de alumínio são cada vez mais prejudiciais para a resistência destas ligas [10, 14].

Tanto no Ti puro como nas suas ligas, principalmente as ligas α+β, as zonas soldadas são praticamente tão resistentes à corrosão como as zonas de material base. Estas zonas mantêm as características de resistência à corrosão desde que o material base mantenha a sua condição. Outros processos de fabrico, (tais como a quinagem, maquinagem ou fusão), não têm influência aparente na resistência à corrosão normal.

O maior problema de resistência à corrosão das ligas de Ti parece ser a corrosão por fissuração, que ocorre em zonas onde o meio corrosivo está virtualmente estagnado. Este mecanismo de corrosão é semelhante ao que acontece para o aço inoxidável. Este tipo de corrosão é muito frequente nas ligações metal-metal tal como acontece na construção soldada deficiente ou na ligação de tubos por soldadura [5, 10, 13, 14].

Ainda neste capítulo, mas no que diz respeito ao uso de Ti para contacto com o hidrogénio (H), este acima dos -100ºC pode ser absorvido e difundir-se na liga. Se isto acontecer, o H difundido pode fragilizar severamente o Ti. Este potencial de fragilização é maior sempre que estiverem em jogo caudais elevados de H ou sempre que haja revestimentos deficientes [14].

2.4.5 - Resistência a Elevada Temperatura

O aumento da temperatura de utilização das ligas de Ti tem sido uma das áreas de investigação e desenvolvimento que mais atenção tem merecido. Têm vindo a ser adoptados três métodos distintos: continuidade no desenvolvimento das ligas quase α, desenvolvimento de ligas de Ti endurecidas por dispersão de precipitados e o desenvolvimento de aluminetos de titânio baseados nos compostos intermetálicos de Ti_3Al e TiAl.

Seagle, Hall e Bomberger [13], demonstraram em 1970 que a adição de 0,1% de Si (silício) à liga Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (quase α) melhorava a sua resistência à ruptura a temperaturas elevadas. Mas não é só o Si que determina o aumento do desempenho a altas temperaturas das ligas quase α, a microestrutura tem também uma grande influência, tal como a disposição e o tamanho das estruturas HC (fase α) e CCC (da fase β).

Enquanto que as técnicas de solidificação têm um papel menor no aumento das temperaturas de operação das ligas de Ti, a maioria das actividades de investigação neste sentido concentram-se no desenvolvimento de aluminetos de titânio. Estes materiais, baseados nos compostos intermetálicos Ti_3Al (α2) e TiAl (γ) têm o potencial de aumentarem a temperatura de aplicação destas ligas para cerca de 650ºC e 800ºC, respectivamente [13].

2.4.6 - Difusão

O conhecimento da taxa de difusão dos elementos intersticiais ou de substituição nas fases α e β , bem como a própria taxa de difusão do Ti, é muito importante. Muitos dos processos produtivos, envolvendo tratamentos térmicos de envelhecimento e solução, deformação a quente e recristalização, são dependentes de mecanismos de difusão. Assim, também muitos aspectos nas aplicações finais vão ser afectados, tais como, rotura, comportamento à oxidação, fragilização devido ao hidrogénio e a super-plasticidade.

Devido aos átomos se encontrarem densamente comprimidos na estrutura HC, a sua velocidade de difusão é consideravelmente mais baixa do que na estrutura CCC.

A figura 2.12 apresenta a selecção de alguns dados relacionados com a difusão nas fases α e β do Ti e de alguns dos elementos de substituição e intersticiais, sob a forma de gráfico de Arrhenius. Pode ser visto que a difusão dos átomos de Ti na fase β é cerca de 3 vezes mais rápida do que a difusão na fase α (linhas Tiα e Tiβ) [6, 13, 14].

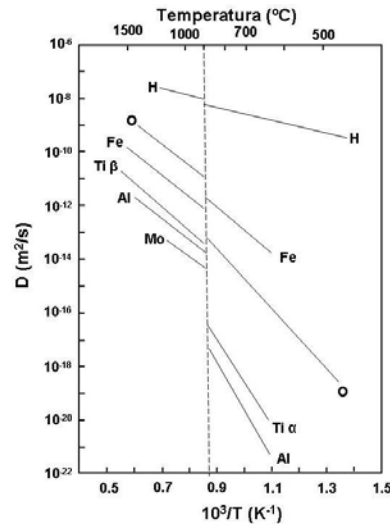



Figura 2.12 - Diagrama de Arrehenius da difusão de Ti e de vários elementos de liga nas fases α e β do Ti (a linha a tracejado representa a temperatura de transformação β – α) [6].

2.4.7 – FADIGA

O tempo de vida de um componente livre de defeitos, exposto a solicitações à fadiga, pode ser dividido em duas fases: uma que descreve a iniciação ao aparecimento de fissuras (Ni) e outra que descreve a propagação destas fissuras (Nf). De uma forma geral, as ligas de Ti têm uma reputação bem conseguida de fiabilidade em trabalhos onde são solicitadas à fadiga. Reputação conseguida através do sucesso das primeiras aplicações na indústria militar, aeroespacial e biomédica, em que estas ligas ficaram expostas a solicitações à fadiga [13, 16]. Na figura 2.13, é comparada a taxa de iniciação de fissuras por fadiga mediante aplicação de uma carga cíclica, entre as ligas de Ti, alumínio e aços.

A resistência à fadiga no Ti puro depende do tamanho de grão, do nível de oxigénio intersticial e das operações de trabalho a frio ou encruamento a que o material foi sujeito. Tal como para o limite elástico e resistência à fractura, o limite à fadiga de convencional no Ti puro depende também do nível de interstícios [14].

Nas ligas de Ti, a somar ao tamanho de grão α, ao grau de envelhecimento e ao conteúdo de oxigénio (nas ligas quase-α e α–β), as propriedades de resistência à fadiga são fortemente afectadas pela morfologia e arranjo das fases α e β, principalmente no que diz respeito à fadiga convencional.

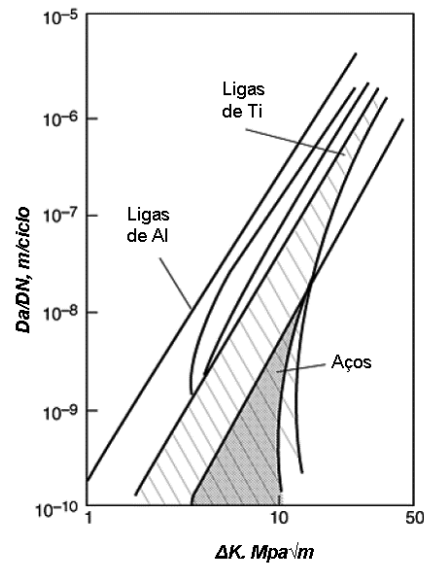



Figura 2.13 - Taxa de iniciação de fissuras em função da intensidade da tensão cíclica, em que se compara as ligas de Ti com aços e as ligas de alumínio.[16]

A figura 2.14 apresenta a vida à fadiga convencional para várias microestruturas da liga TI6Al4V, e podem ser vistas fissuras típicas em algumas das microestruturas da liga atrás mencionada.

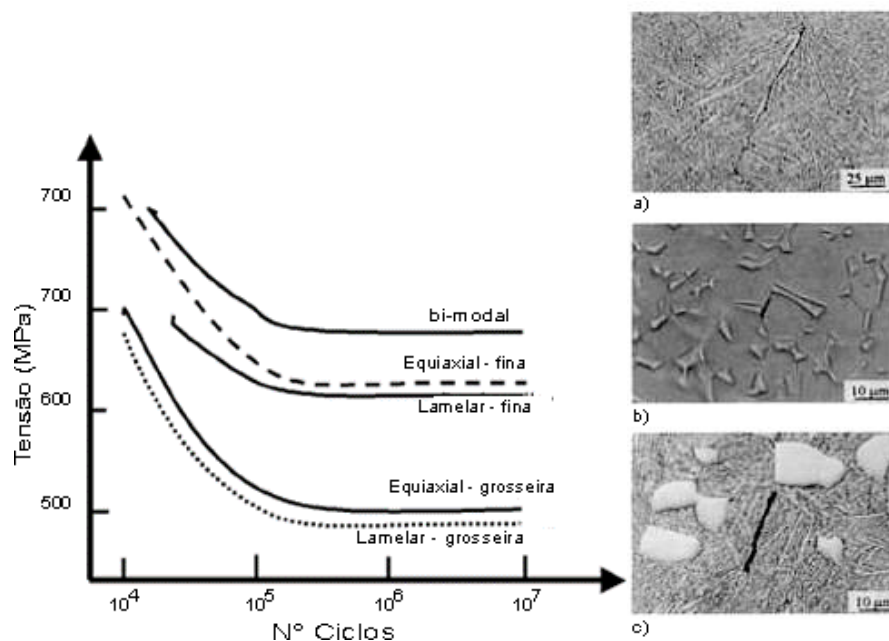



Figura 2.14 - Vida à fadiga de alto ciclo do Ti6Al4V, liga α-β: β forjado (100% fase β transformada); 10% fase α primária (equilíbrio com a fase β transformada) [8]. Fissuras de fadiga na liga Ti6Al4V:a) microestrutura completamente lamelar; b) microestrutura completamente equiaxial; c) microestrutura dupla [14]

Nestas ligas, há consenso que as microestruturas com colónias α–β (como a liga TI6Al4V), têm menor resistência à fadiga no geral. De realçar contudo, que a resistência à iniciação de fissuras é optimizada nas estruturas α-β, que apresentam

altos teores de fase β modificada, mais ainda quando estão presentes quantidades de fase α de cerca de 10% [14].

Para além da microestrutura, o potencial das ligas de Ti pode ser significativamente afectado pelo estado superficial ou tratamentos a que são sujeitas. Tratamentos mecânicos superficiais tais como o *"shot peening"*, polimento ou laminagem, podem ser usados como métodos para melhorar o limite de resistência à fadiga por alterarem a rugosidade da superfície, tensões residuais e o grau de encruamento, (figura 2.15).

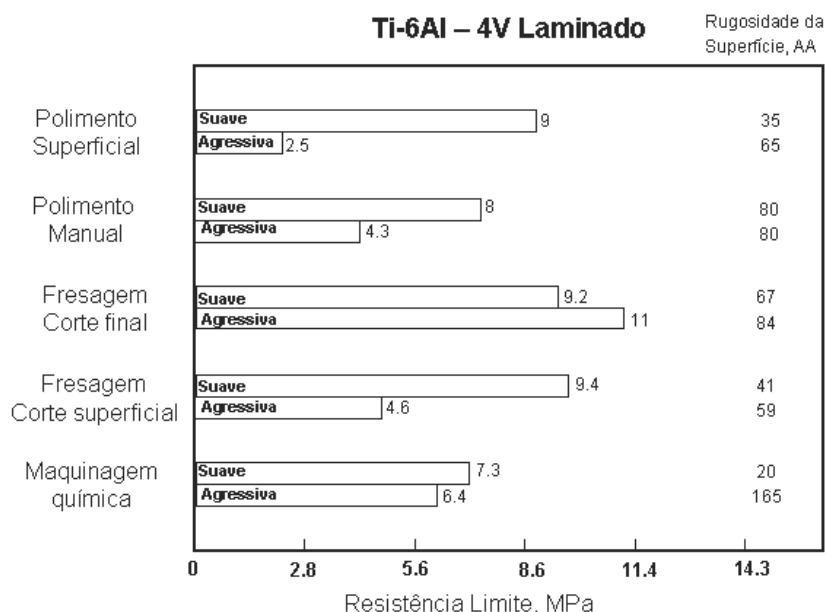



Figura 2.15 - Efeitos relativos das operações de maquinagem e acabamento no limite de resistência da liga Ti 6AL4V [1].

O comportamento das ligas de Ti à fadiga oligocíclica é muito difícil de quantificar devido ao grande intervalo de variáveis e principalmente devido à quantidade limitada de informação publicada.

O efeito da temperatura raramente é referido. Na fadiga convencional, e dependendo das ligas, o limite de resistência à fadiga tende a ser relativamente estável até temperaturas de aproximadamente 320ºC. Por exemplo, para a liga TI6Al4V com ciclos estáveis e sujeita a uma determinada pré carga, o limite de fadiga a uma temperatura de 204ºC é cerca de 11% mais baixa, (figura 2.16).

A propagação de fissuras é afectada por variáveis tais como a resistência mecânica, microestrutura e a textura cristalográfica. Devido à natureza reactiva do Ti, também deve ser esperado a influência de efeitos ambientais na propagação de fissuras.

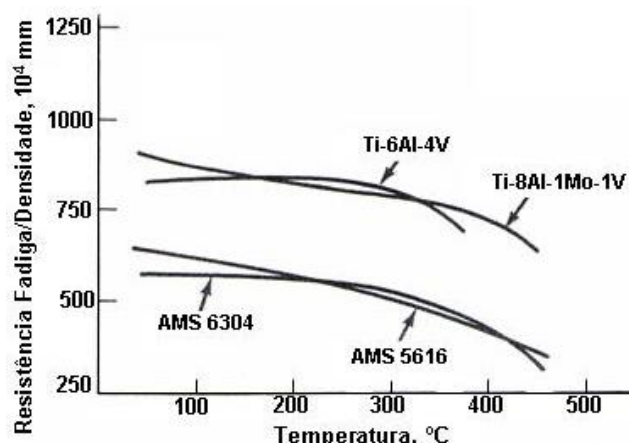



Figura 2.16 - Comparação para aços e ligas de Ti, do efeito da temperatura na resistência à fadiga de alto ciclo [14].

Geralmente só ambientes mais severos afectam a taxa de propagação de fissuras, sendo estes efeitos geralmente minimizados através de tratamentos de recozido da fase β. Em termos de microestrutura, a taxa de propagação de fissuras é reduzida com uma microestrutura transformada, tal como acontece para a rigidez. Geralmente, microestruturas β recozidas têm a menor taxa de crescimento de fissuras, enquanto que microestruturas recozidas de produtos maquinados apresentam a taxa mais elevada [8, 11, 14]

2.5 - FABRICO DAS LIGAS DE TI

Para a obtenção de um componente final em Ti ou suas ligas com as propriedades desejadas, é necessário converter produtos semi-acabados nas formas finais. Este processo requer o uso das diversas formas de produção usadas para os metais em geral: arranque de material sob a forma de apara; fundição; conformação plástica e modificação químico – estrutural e de estado do material.

Uma vez que o valor dos produtos semi-acabados de Ti é já relativamente elevado, devido ao seu processo de obtenção, a transformação destes nas formas finais obriga à exploração de várias alternativas no sentido de reduzir o preço final do componente a obter. Assim sendo, a optimização dos custos dos componentes de Ti, resulta de uma selecção cuidadosa e criteriosa dos processos de produção. Neste ponto em particular, os processos “near net shape” (NNS), têm o potencial de reduzirem substancialmente os custos de fabrico e simultaneamente reduzirem o desperdício de metal.

A conversão do lingote em produtos semi-acabados nas mais diversas formas: barra, chapa, placa, fita, fio e tubo, denomina-se fabricação primária. Para a obtenção da forma final recorre-se aos princípios de produção de formas acima mencionados que consistem em: forjamento, fundição, metalurgia dos pós (MP), maquinagem, conformação plástica e técnicas de ligação, denominados processos secundários.

As técnicas de maquinagem para as ligas de Ti não são mais difíceis do que aquelas que são utilizadas para metais, como por exemplo o aço inoxidável austenitico. Taxas de produção razoáveis e excelente acabamento superficial são facilmente alcançáveis para peças de Ti maquinadas, contudo, existem algumas limitações que são reconhecidas devido às propriedades físicas e químicas destas ligas, que levam a que a sua maquinagem seja mais dispendiosa, figura 2.17:

Figura 2.17 - Maquinagem de Ti [7].

- A baixa condutividade térmica do Ti e a forma invulgar da apara dificulta a rápida dissipação do calor gerado, provocando o aquecimento da ponta da ferramenta de corte. Isto conduz a um maior desgaste das ferramentas;
- O baixo módulo de elasticidade destas ligas conduz a um retorno elástico significativo após a aplicação de um esforço de deformação, originando um deslocamento das peças relativamente à ferramenta de corte durante a maquinagem.
- A baixa dureza do Ti e a sua elevada reactividade química conduz a abrasão, adesão e danificação do Ti com a ferramenta de corte.

Quando as condições de maquinagem e a sequência do processo são seleccionadas mediante a especificidade da liga, conseguem-se taxas de produção razoáveis a preços aceitáveis.

Devido ao elevado desperdício de material que normalmente está associado à maquinagem de peças em Ti a partir das formas primárias, e ao custo envolvido, a obtenção das mesmas por recurso à fundição torna-se uma alternativa que pode conduzir a poupanças significativas, especialmente para peças de maior dimensão e de formas mais complexas.

A obtenção de peças por fundição pode ser considerada o processo clássico de NNS, uma vez que permite a obtenção de peças sem um extenso recurso a técnicas de pós-processamento como a maquinagem ou maquinagem química. No entanto a fundição de peças de Ti é sempre um desafio devido à sua elevada reactividade com a atmosfera e com os materiais refractários convencionais, e a sua baixa fluidez no estado líquido.

Existem dois métodos principais de obtenção de peças de Ti por fundição: fundição em moldações de areia de grafite (*“rammed graphite mold casting”)* e fundição de precisão (*“investment casting”).*

A técnica dos moldes de areia de grafite, figura 2.19, é um processo semelhante à fundição em areia, e é considerado um processo pouco dispendioso e particularmente interessante para peças de grande dimensão. Para prevenir a reactividade neste processo é usado um spray cerâmico para moldações e um forno do tipo “*Vaccum arc skull*” [15].

Figura 2.18 - Moldações para o processo moldação em areia de grafite, após queima e à espera de serem preparadas com spray para o vazamento [15].

A técnica de fundição de precisão, técnica usada neste projecto, é preferida à anterior, em peças onde são exigidas tolerâncias apertadas, secções finas, ângulos pequenos e melhores acabamentos superficiais. Devido à alta reactividade do Ti líquido, a fusão e vazamento são realizados com recurso a atmosferas inertes em vácuo, cadinhos frios e materiais refractários pouco reactivos para o fabrico de moldações e cadinhos. A reacção do Ti com os refractários resulta na geração de

uma camada onde houve contacto entre os dois elementos, denominada “α-case”, e que tem efeitos muito negativos nas propriedades mecânicas dos componentes. Esta camada deve ser removido com recurso à maquinagem química.

Outra prática comum é, no final do processo de fundição, a eliminação da porosidade inevitável do interior dos componentes obtidos. Para isso, recorre-se à prensagem isostática a quente (HIP-Hot Isostatic Pressing), abaixo da temperatura de transição β e a pressões de cerca de 100 – 200 MPa [6, 13].

Os custos associados aos produtos obtidos pelos processos de maquinagem, conformação e forjamento têm forçado a desenvolvimentos no sentido de melhorar as técnicas e os métodos de obtenção de componentes por fundição [2].

As ligas de Ti podem também ser obtidas por todas as técnicas de forjamento actualmente existentes. Os parâmetros de forjamento e o estado metalúrgico inicial das ligas de Ti têm grande influência na microestrutura e propriedades do componente final. Operações sequenciais de forjamento podem ser necessárias para a obtenção dos resultados desejados. Um dos propósitos do forjamento das ligas de Ti, em adição à obtenção da forma, é a obtenção da combinação de propriedades mecânicas que geralmente os produtos semi-acabados e fundidos não têm. As ligas de Ti são difíceis de forjar, mas apesar de tudo são mais fáceis de forjar do que os metais refractários e as superligas.

No que diz respeito à conformação plástica, o Ti é mais difícil de trabalhar do o aço ou as ligas de alumínio. Geralmente estas têm características de conformação menos previsíveis do que as ligas mencionadas. Contudo, e como foi referido anteriormente (devido ao retorno elástico deste material) desde que as limitações destas ligas sejam conhecidas, e sejam estabelecidas algumas orientações para a conformação a quente e a frio, estas podem ser conformadas em componentes complexos. As ligas de Ti podem ser conformadas em máquinas standard com tolerâncias semelhantes às usadas na conformação de aços inóxidáveis.

Para reduzir o efeito do retorno elástico na exactidão, e para ganhar a vantagem do aumento da ductilidade, a maioria dos componentes obtidos por conformação, resultam do uso da conformação a quente ou por conformação a frio seguidos de um ajustamento a quente para a forma desejada, como referido atrás [13, 14].

A metalurgia dos pós (MP) ou pulverometalurgia é uma ferramenta muito viável para a produção de componentes de formas complexas, com utilização de poucos passos

de maquinagem no pós-processamento, com significante redução de custos e redução no desperdício de material. O fabrico de componentes através da MP, oferece o potencial de obtenção de formas verdadeiramente NNS combinadas com excelentes propriedades mecânicas, iguais, ou que excedem mesmo as dos produtos obtidos por fundição e por técnicas normais de processamento.

De um modo geral, os componentes de Ti da MP, figura 2.20, podem ser obtidos por dois processos diferentes: o método conhecido como mistura elementar (Blended Elemental – BE), que consiste na mistura de pós elementares com os elementos de liga principais ou outras adições desejadas, que são prensados a frio para a forma desejada e posteriormente sinterizados; e o método conhecido como pré-ligados (prealloyed - PA) onde são usados pós de ligas já feitas, que são conformadas a quente. O método BE produz componentes de baixo custo com propriedades inferiores, por outro lado os produtos obtidos pelo processo PA apresentam excelentes propriedades mecânicas, melhor densidade e consequentemente preço mais elevado. O processo PA destina-se a produzir componentes de formas complexas e de alta performance com propriedades comparáveis ou mesmo superiores às obtidas pelos processos metalúrgicos normais.

Figura 2.19 - Produto de desporto obtido por MP em ligas de Ti, CermetTi [3].

Actualmente, os elevados custos destes processos e dos respectivos equipamentos, apenas são justificados num destes casos: a produção de componentes com recurso a novas ligas de Ti não é possível pelos processos habituais, na produção de compósitos de matriz de Ti, ou para grandes séries de peças relativamente pequenas. Tendo em vista a completa exploração do potencial da MP para as ligas de Ti, têm sido feitos esforços substanciais para a redução dos custos dos pós e dos componentes obtidos à base deste processo. Esta é actualmente uma área onde os avanço se fazem sentir com grande intensidade como irá ser visto à frente [2, 6, 13, 14].

Bibliografia capítulo 2

[1].Livro - Boyer (**1986**). "Atlas of fatigue curves", American Society for Metals,Metals Park, OH.

[2].Artigo - Brian E. Hurless (**2002**). *"Lowering the Cost of Titanium."* AMPTIAC Vol. 6(2):pag.

[3].CermetTi, *Basebol club*. 2005, CermetTi.

[4].Livro - Chiaverini (**1986**). "Tecnologia Mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas ", Mc Graw-Hill, 1.

[5].Livro - Collings (**1994**). "Materials Properties Handbook: titanium and titanium alloys", ASM International, 1.

[6].Livro - Gerd Lutjering (**2003**). "Titanium", Springer.

[7].Globalspec. (**2007**). *"Titanium machining."* www.globalspec.com.

[8].Livro - Harper (**2001**). "Handbook of materials for product design", McGRAW-HILL, 1.

[9].Livro - International (**1985**). "Mettallography and microstruture ", A. International, 9.

[10].Livro - International (**1992**). "Corrosion", ASM International, 13.

[11].Livro - International (**1992**). "Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials", ASM International.

[12].Livro - International (**1998**). "Metals book desk edition", 1.

[13].Livro - Leyens C. (**2003**). "Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications", WILEY- VCH.

[14].Livro - Matthew J. Donachie (**2000**). "TITANIUM: a technical guide", ASM International.

[15].Artigo - O'Connor (**2007**). *"Titanium rammed graphit castings for military applications."* AMMTIAC Vol. 2(1):pag.

[16].Livro - R.J. Bucci (**1996**). "Fatigue and fracture properties of titanium alloys", ASM International, A. Handbook, 19.

[17].S. P. Fox (**2003**). *"10th World Conf. on Titanium "*. Ti-2003 Science and Technology, Germany.

[18].US Department of Energy (**2002**), "Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles by EHKT Technologies" US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory.

CAPÍTULO 3

O MERCADO DAS LIGAS DE TITÂNIO

3– MERCADO DAS LIGAS DE TITÂNIO

Aproximadamente meio século depois da sua introdução no meio técnico, as ligas de Ti têm um vasto leque de aplicações industriais que vão desde aplicações de alto valor tecnológico, como a área aeroespacial, até aplicações mais comuns ao normal utilizador, como equipamento desportivo ou joalharia. O recorde de realização tem sido notável. O futuro previsto há um quarto de século para este metal tão versátil como caro, quer em termos de materiais quer em termos aplicações, é agora comum.

Actualmente o Ti e as suas ligas desempenham um papel cada vez mais importante no panorama mundial e esta tendência é para aumentar. O que começou por ser um metal de uso quase exclusivo de alguns nichos industriais (aeroespacial, aeronáutica e militar), tem vindo nos últimos anos a tornar-se uma escolha cada vez mais comum de engenheiros, arquitectos e designers que lhe reconhecem as suas características únicas [2].

As aplicações comerciais de Ti, na grande maioria dos casos, têm seguido os desenvolvimentos militares e aeroespaciais. Os requisitos da indústria química, automóvel, biomédica e desportiva, entre outras, foram causas secundárias que contribuíram para o enriquecimento das bases tecnológicas das ligas de Ti. Na verdade esta é ainda uma realidade muito actual, uma vez que avanços tais como os aluminetos de titânio (TiAl), compósitos e cerâmicos de matriz metálica (de titânio) ou as tecnologias como metalurgia dos pós e a conformação superplástica têm vindo, e continuarão a ser, impulsionadas pelas necessidades militares e aeroespacial [16].

Contudo, devido ao preço ainda relativamente elevado – principalmente como resultado dos custos de extracção e produção – estas ligas apenas são usadas quando é a única escolha possível ou quando a relação custo/ beneficio não deixa dúvidas. Por estas razões, as grandes linhas de desenvolvimento das ligas de Ti tem-se verificado com maior intensidade na tentativa de redução de custos, do que propriamente no desenvolvimento de ligas com propriedades melhoradas ou propriedades especificas para determinadas aplicações e/ou processos. Em termos gerais, a redução de custos

pode ser conseguida através da redução nos custos de produção do próprio metal em si, ou através de técnicas criativas de fabrico de produtos finais [6]. O custo do Ti comparado com o aço ou o alumínio é mostrado na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Custos do Ti em 2007, comparação com outros metais concorrentes [6].

	Material (€/kg)		
Tipo	**Aço**	**Alumínio**	**Titânio**
Minério	0.03	0.02	0.33
Metal	0.15	1.66	8.24
Lingote	0.23	1.74	13.74
Chapa	0.45-0.91	1.51-7.57	22.72- 75.72

3.1- Consumo de Ti

Muitos peritos concordam com o facto da produção de Ti ser muito aquém, para as propriedades que este metal oferece. Como tal, os grandes fornecedores de Ti esperam que a subida na procura de Ti duplique nos próximos 10 anos [3].

O mercado do Ti esteve sempre muito ligado ao desenvolvimento que acontecia no sector aeroespacial durante os anos que sucederam à guerra-fria. Durante o *“boom”* desta indústria foi pouca a atenção dada ao desenvolvimento de técnicas menos dispendiosas de obtenção e produção destas ligas, estando todos os esforços concentrados no rápido acesso ao material.

Esta dependência do sector aeroespacial provocava grande instabilidade nos preços, o que afastava sectores mais racionais, como o sector automóvel, em comprometer-se com o Ti. Contudo, o crescimento na utilização deste metal por parte de alguns sectores do mercado, mesmo que em quantidades residuais, fez com que os preços, apesar de altos, estabilizassem e permitissem a entrada de novos mercados (tabela 3.1). Os principais sectores responsáveis por esta subida são [2, 6]:

- A aviação civil – impulsionada pelo crescimento deste mercado devido ao aumento do tráfego aéreo, e a consequente necessidade de maior eficiência na utilização de combustíveis, que obriga a construções mais leves e motores mais eficientes;

- A indústria – derivada principalmente do crescimento de sectores tais com energia, química, petróleo e gás e impulsionada pelo crescimento dos mercados asiáticos como a Índia e a China;
- A defesa – principalmente na aviação mas também em mercados emergentes tal como no desenvolvimento de tanques, veículos e armamento pesado;
- Mercados emergentes – novos desenvolvimentos no mercado automóvel, no mercado médico, joalharia, arquitectura, desporto e defesa.

São várias as tendências que estão na base do consumo actual e futuro de Ti [3]:

- A procura e a tentativa de estabilidade do mercado do petróleo estão a conduzir as explorações de petróleo para ambientes cada vez mais exigentes;
- A necessidade de performance, eficiência e regulamentação ambiental têm conduzido o segmento dos transportes na direcção do Ti, como é o caso de várias aplicações estruturais na aviação, que representa um dos mercados com maior crescimento, e vários componentes no sector automóvel;
- Os conflitos mundiais e a tensão global que têm um efeito negativo na economia, potenciam o uso de Ti na redução do peso do armamento e melhoramento da sua mobilidade;
- As expectativas sobre o crescimento de GDP (Gross Domestic Products – Método de medir a dimensão da economia de um país), e a sua expansão contínua na China e na Índia, juntamente com outras áreas de desenvolvimento, trazem optimismo na utilização de Ti na geração de potência, dessalinização, processos químicos, transportes, decoração e desporto, (ver figura 3.1).

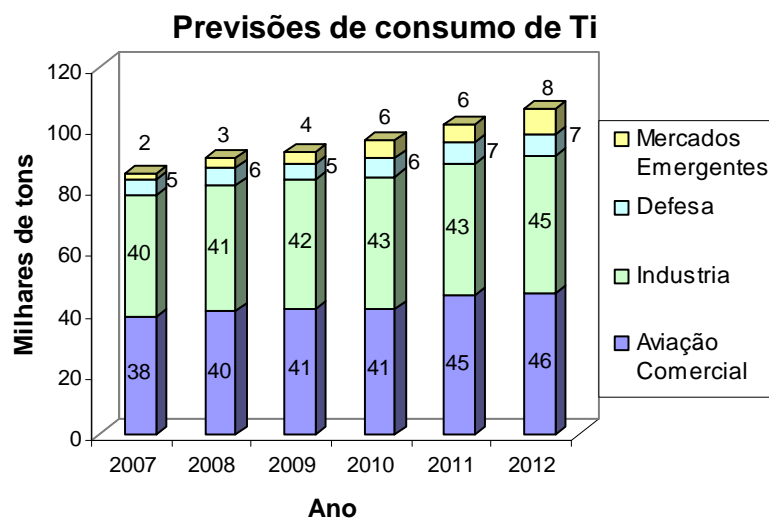



Figura 3.1 - Previsões do consumo de Ti, realizada pela TIMET junto dos seus clientes [3].

Os principais factores que vão potenciar o aumento da utilização de Ti nos vários sectores prendem-se com: o aparecimento de novas técnicas de extracção do metal a partir do minério, o aparecimento de novas técnicas de fabrico, e novas combinações entre o Ti e outros materiais, principalmente compósitos e cerâmicos. Um exemplo disso é o um estudo levado a cabo por T.E. Norgate e G. Wellwood [6], sobre a possível penetração no mercado de aplicações obtidas a partir de pós de Ti puro resultantes da diminuição de custos na obtenção. Neste estudo ficou demonstrado que a diminuição do custo do Ti pode ter a grande influência no número de aplicações para estas ligas (um aumento de cerca 1100% no consumo destas ligas). Apesar de parecer pouco realista, este valor mostra a grande influência que o custo do metal pode ter no número de aplicações [10].

3.2 – Avanços e Direcções Futuras

Novos materiais e processos tecnológicos correntemente em vários estádios de desenvolvimento têm o potencial de influenciar profundamente o uso futuro das ligas de Ti e também o seu custo final. O anúncio de novos processos de extracção do metal, o aumento da temperatura limite de uso das ligas de Ti, através do desenvolvimento de aluminetos de titânio e de compósitos de matriz de titânio, o uso da metalurgia dos pós de rápida solidificação (RSR – rapid-solidification rate powder metallurgy), o processamento de pós por spray para a criação de pré-formas, o uso de novas técnicas de conformação plástica e deposição física por vapor (PVD – Physical Vapor Deposition) e a fundição em moldações metálicas, são áreas que prometem reforçar o uso e o leque de aplicações destas ligas de Ti bem como diminuir o custo dos sues componentes.

3.2.1 – Técnicas de Extracção

Nos últimos anos tem-se assistido a muita actividade no desenvolvimento de novos processos para a extracção de Ti a baixo custo. Este facto deve-se ás pressões das várias indústrias, como a automóvel, médica ou a militar, onde uma redução de custos pode reflectir-se num aumento significativo do uso destas ligas.

Apesar de tudo é preciso ter presente que o processo de extracção de Ti representa apenas uma pequena parcela no custo total de um componente fabricado por fundição ou forjamento [6].

3.2.1.1 – Processo actual de obtenção de Ti

A produção de componentes em Ti, inicia-se com a obtenção da esponja de Ti a partir do minério de Ilmenite (FeTiO3) e de Rutilo (TiO2) onde o Ti se encontra sob a forma de um óxido. A extracção do Ti destes minérios ocorre em cinco passos [18, 20]:

- A obtenção de tetracloreto de titânio (TiCl4);
- A destilação do TiCl4 para o purificar;
- A redução do TiCl4 para produzir o Ti metálico, com aspecto de esponja (através do processo de Kroll, de 1930 (figura 3.2) ou processo de Hunter – que utiliza Na em vez do Mg do processo de Kroll) - o processo de extracção propriamente dito acaba aqui;
- Purificação, através da destilação em vácuo, do Ti metálico em esponja para remover os sub-productos do processo de redução;
- A trituração do Ti metálico para a criação de um produto para a subsequente fusão em Ti puro ou ligas de Ti.

A causo do aumento dos custos de Ti no caso do processo de Kroll, é no processo de purificação, realizado através da destilação em vácuo, figura 3.2 [18, 20]. A esponja, é a principal matéria-prima usada nas operações de fusão para a produção de lingote ou barra, (processos de fabricação primária). Destes, aquele que é mais comummente usado é o VAR – Vacuum Arc Remelting, figura 3.3.

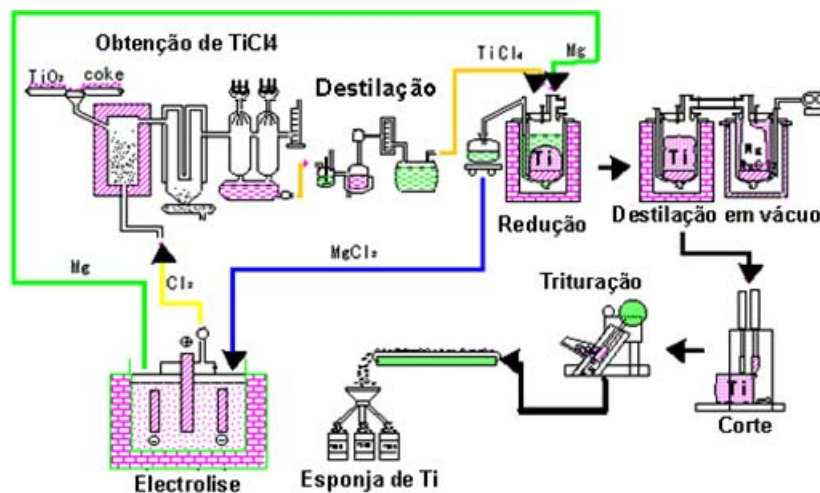



Figura 3.2 - Processo obtenção da esponja de Ti (Processo Kroll) [19].

Este processo produz apenas lingotes redondos e por norma são realizadas entre duas a três operações de fusão até à obtenção do produto final. Estas múltiplas fusões e a trabalhosa preparação do eléctrodo são duas fontes de elevado custos deste processo. Outro processo comummente usado é o ESR – Electroslag Remelting (Refusão por electroescória), muito parecido com o processo VAR.

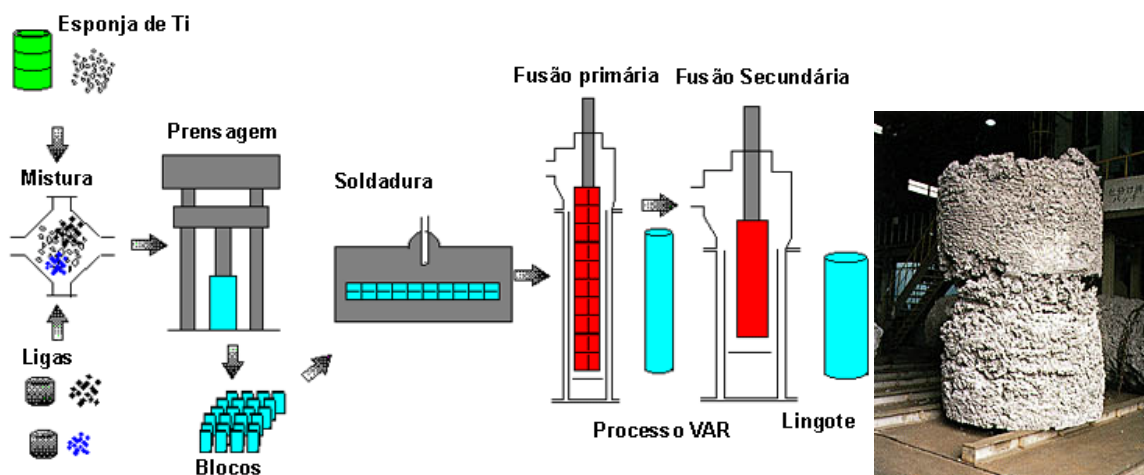



Figura 3.3 - Obtenção de lingotes através do processo VAR.Esponja de Ti [19].

Outros dois processos primários, mais recentes, mas que já apresentam alguma redução de custos face aos anteriores, são os denominados por Cold Hearth Melting: o PAM – Plasma Arc Remelting, e o EBM – Electron Beam Melting, que oferecem a flexibilidade de utilizarem mat´rias - primas de baixo custo, como é o caso da sucata. Outras vantagens destes processos, prendem-se com a obtenção de um lingote de melhor qualidade e a produção de lingotes com formas redondas ou rectangulares com apenas um passo de fusão [2, 9, 15, 16, 18-20].

VersaCast é o nome de um novo processo de fusão desenvolvido pela Lectrotherm Process System Inc (USA), para obtenção de lingotes em ligas de Ti. Os inventores deste processo, reclamam ser um processo mais produtivo onde os lingotes obtidos apresentam melhores características dimensionais. Este processo é conhecido pelo anacronismo SNAPP – Simultaneous Non-consumable Arc-melting/Plasma –refining, e junta duas tecnologias nas mesmas operações de fusão e refinamento: o arco eléctrico directo (DAE) e o plasma, figura 3.4.

Este processo tem também a capacidade de obtenção de peças *near net shape* (NNS) de complexidade reduzida. Tem a capacidade de fundir retornos e sucata sem prévia preparação e é um processo mais flexível em termos do volume de lingote final a obter. Mas a mais importante das vantagens reclamada para este processo, prende-se com o facto de não serem necessárias mais do que uma fusão (o VAR pode exigir duas a três

fusões). Assim este é um processo mais rápido do que o VAR ou o EBM, que oferece competitividade na produção de lingotes [12].

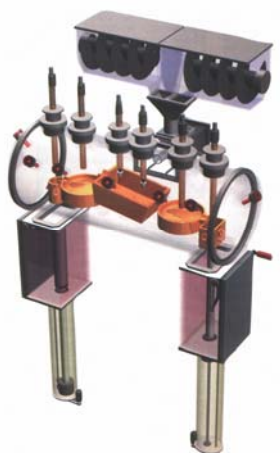



Figura 3.4 – Processo VersaCast para obtenção de lingotes de Ti [12].

3.2.1.2 – Novos processos de obtenção de Ti

Na conferência da ITA (International Titanium Association) em Scottsdale, Arizona, EUA, em 2005, foi apresentado por E.H. Kraft, uma revisão dos vários processos de extracção de metal de Ti que estão em fase de desenvolvimento em todo o mundo, tendo sido referidos 20 novos processos em fase de desenvolvimento, muitos deles usando o óxido de Ti como percursor. Isto faz algum sentido, uma vez que o preço do Ti contido no óxido é menor do que aquele que está contido no composto intermédio (tetracloreto) do processo Kroll [6].

A extracção electroquímica é considerada a chave tecnológica necessária para a redução significativa dos custos de produção de Ti, onde as principais vantagens relativamente aos processos termoquímicos são: a redução no consumo de energia, a automatização e a produção continua.

Alguns dos novos processos substituem apenas passos do processo convencional de obtenção de lingote, contribuindo portanto para uma redução dos custos de obtenção do metal. Os processos mencionados estão presentes na tabela 3.2.

De entre estes processos, o FFC - Fray – Farthing – Chen, ou processo de Cambridge como é mais conhecido, foi cotado como capaz de produzir esponja ao preço de 2.7$/Kg (1.9 €/kg), bem abaixo dos 9.46 $/kg (6.75 €/kg) do processo Kroll. Porém, outras análises a este processo colocaram o preço do seu produto final perto do preço do processo Kroll [6].

Tabela 3. 2 - Processos de extracção de Ti em desenvolvimento [6, 18].

Processos de extracção de Ti		
Técnicas	**País**	**Produto(s)**
FFC/Cambridge Univ./Quinetiq/TIMET	Inglaterra	Bloco em pó
MER Corp.	EUA	Pó, Barra sólida
SRI International	EUA	Pó, Granulado
BHP Billiton	Austrália	ND
Idaho Ti. Tech.	EUA	Pó
Ginatta	Itália	Liquido ou como barra
OS(Ono/Suzuki/Kyoto Univ.)	Japão	Pó / Esponja
MIR Chem	Alemanha	Partículas
CSIR	África do Sul	Esponja
OKABE-I	Japão	Pó compactado
OKABE-II	Japão	Pó Compactado poroso
Vartech	EUA	Pó
Northwest Inst. For Non-Ferrous Metals	China	ND
CSIRO	Austrália	ND
Armstrong/Int. Ti.Powder	EUA	Pó
DMR	-	ND
MIT	EUA	ND
QIT/Rio Tinto	Canadá	Ti Liquido
Tresis	-	ND
Dynamet Technology	USA	ND

No entanto, destes novos processos, aquele que mais perto está da comercialização é o Armstrong/International Titanium Powder (ITP), do qual se espera que aumente a produção para 15000 Ton/ ano, já nos próximos anos. Por outro lado, o processo que mostra maior potencial é o processo MER Corporation's, que está projectado para a produção de Ti a 3.5 $/kg (2.5€/kg). Por agora, ainda não é possível dizer se algum destes processos vai chegar à maturidade do processo de Kroll, porém a expectativa de todos os agentes deste mercado é a redução de preços da matéria-prima de Ti num futuro próximo, potenciando assim o aumento do seu consumo [6, 18, 20].

3.2.2 – ALUMINETOS DE TITÂNIO

Aplicações como compressores e turbinas de turboreactores de aviões, turbinas de turbocompressores (na exaustão), e outras aplicações estruturais a altas temperaturas para a indústria aeroespacial, requerem frequentemente o uso de superligas. A substituição destas superligas, por ligas de Ti mais leves, pode conduzir a reduções de

peso significativas. Contudo a temperatura limite de utilização das ligas de Ti correntes é de cerca de 595ºC.

Novas classes de materiais baseados nos compostos intermetálicos de TiAl têm vindo a ser desenvolvidos. Apareceram inicialmente dois candidatos para servirem de bases intermetálicas de aluminideos: alfa 2 (Ti3Al) e gama (TiAl), aos quais sucedeu o aparecimento de uma terceira, a base intermetálica ortorrômbica. Estes materiais têm uma densidade semelhante à das ligas de Ti mas podem ser usados a temperaturas mais elevadas, entre os 600ºC e os 800ºC. A esta temperatura, os TiAl apresentam melhor módulo de elasticidade do que as ligas de Ti à temperatura ambiente [16]. Estas ligas têm também uma excelente resistência à corrosão a baixas temperaturas, mas existe um limite real para a cessação da formação da camada óxida protectora, neste caso o TiO_2 (dióxido de titânio), que é acima dos 871ºC. A ductilidade destas ligas a temperaturas elevadas é considerada satisfatória [18, 19].

Á imagem do que acontece com as ligas de Ti, no processamento destas ligas podem ser usados os métodos convencionais de processamento, sendo o "*investement casting"*, uma das técnicas mais utilizadas, como é o caso das turbinas de baixa pressão (LPT) e os compressores de baixa pressão (HPC) dos motores de aviões, (figura 3.5). Estruturas mais volumosas são mais difíceis de obter por fusão, devido à necessidade de serem submetidas a pressão isostática a quente (HIP – Hot Isostatic Pressure) para se conseguirem as propriedades óptimas.

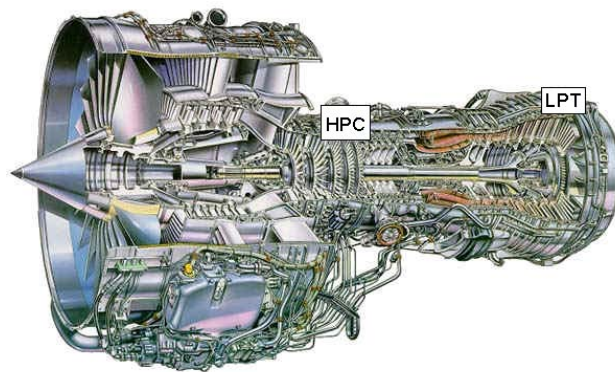



Figura 3.5 - Os aluminetos de titânio são materiais estruturais leves promissores para as aplicações a altas temperaturas, tais como as turbinas de baixa pressão e os compressores de alta pressão, neste caso num motor de avião BR 715 da Rolls Royce [22].

Para além da indústria aeronáutica, também a industria automóvel tem recorrido a estas ligas nas turbinas de axaustão de turbocompressores, (figura 3.6).

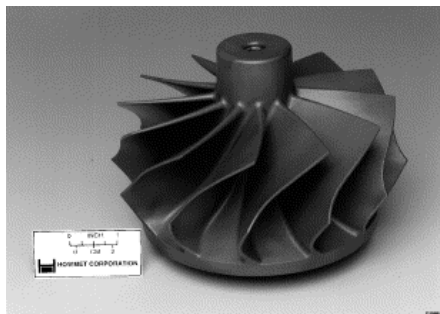



Figura 3.6 - Turbina em TiAl para a zona quente do turbocompressor obtida por fundição [11].

Estas ligas aumentam o leque de aplicações possíveis para o Ti. Porém a sua utilização é ainda limitada devido ao facto de terem uma ductilidade e resistência à fractura limitadas à temperatura ambiente, que as torna difíceis de processar ou fabricar, á semelhança das superligas.

Neste caso a tecnologia da fundição desempenha um papel fundamental, pelo ao facto de estas ligas serem menos reactivas, por terem percentagens de alumínio mais elevadas (da ordem dos 40 a 50%), e um ponto de fusão mais baixo do que as ligas convencionais. A presença de alumínio em maior% facilita também o processo de arrefecimento destas ligas, fazendo aumentar o valor mínimo de temperatura para a qual pode ocorrer contaminação, permitindo assim ciclos de produção mais elevados [14].

3.2.3 – COMPÓSITOS DE MATRIZ METÁLICA DE TI

A pressão constante para o aumento de performance na aeronáutica (nos aviões e motores) conduziu a estudos de investigação e desenvolvimento nos compósitos com matrizes metálicas à base de Ti (TMC – Titanium matrix composite). Estes materiais são considerados, uma futura opção para aplicações chave, tais como turbinas para os motores de aviação civil.

Os TMC são sem dúvida um conceito inovador de materiais que combinam a elevada resistência, rigidez e resistência à fractura das fibras com a tolerância à deformação das ligas de Ti. Estas propriedades das fibras usadas nos TMC significam que um compósito de Ti pode apresentar quase o dobro de rigidez que uma liga de Ti convencional, ultrapassando a rigidez do aço. Os TMC são geralmente reforçados com fibras contínuas de carboneto de Silício, mas também podem ser obtidos com fibras pequenas, “*whiskers”* e partículas cerâmicas. São geralmente obtidos por deposição por plasma ou por deposição de partículas da matriz de Ti nas fibras.

Os compósitos de matriz de Ti reforçadas com partículas são outro subproduto desta categoria. Esta família de materiais inclui a escolha de várias cerâmicas ou adições

intermetálicos (p.e. TiC, TiB_2 e TiAl) em diferentes percentagens (10 a 20% em peso). Têm vindo a ser desenvolvidos esforços na produção de TMC com TiAl reforçado com 7% (em volume) de TiB2.

Os TMC reforçados com partículas são produzidos com recurso à metalurgia dos pós. Estes materiais são processados em formas próximas das finais através da utilização na prenssagem isostática a frio e podem ser depois refinadas através do forjamento ou extrusão. Quando comparados com as ligas de Ti não reforçadas, estes materiais apresentam um módulo de elasticidade e resistência à tracção melhoradas, quer à temperatura ambiente quer a temperaturas mais elevadas, aumentando assim a temperatura de utilização mantendo aproximadamente a mesma densidade.

Os preços dos TMC são fortemente influenciados não só pelo custo das fibras, devido ao baixo volume relativo que têm, mas também pelo actual no desenvolvimento e consolidação das técnicas de produção industriais.

Os custos de produção, a consistência das propriedades dos produtos obtidos, a resistência à oxidação por parte das fibras e das matrizes, e a reparação em caso de danos, são as maiores preocupações e entraves à aplicação destes materiais compósitos. É pouco provável a utilização destes materiais num futuro próximo em aplicações mais comuns, e podem nunca vir a ser substitutos rentáveis para outros componentes metálicos, cingindo-se apenas a pequenos nichos de mercado [9]

3.2.4 – CONFORMAÇÃO SUPERPLÁSTICA | SOLDADURA POR DIFUSÃO

A Conformação superplástica (SPF – Superplastic Forming) aliada à ligação por difusão (DB – Difusion Bonding) – SPF/DB - é provavelmente o processo de obtenção de formas próximas das formas finais mais espectacular. É uma tecnologia que tem recebido grande atenção pelos custos reduzidos e pelo desempenho mostrado no melhoramento da eficiência estrutural em componentes aeronáuticos

O processo SPF/DB aproveita a superplasticidade de algumas das ligas de Ti no fabrico de geometrias. Consiste no posicionamento de uma chapa de Ti entre duas metades de um molde e aquecê-la até à sua temperatura de deformação (que para o Ti6Al4V é de 925ºC). É injectado árgon quente para o interior do molde e são aplicadas pressões (inferiores a 70 bar) no meio molde superior que obrigam a chapa a deformar-se superplasticamente e a encostar ao meio molde inferior adquirindo a sua forma final. Por fim, processos de soldadura por difusão locais permitem a obtenção de estruturas em chapa de formas tridimensionais complexas. As ligas de Ti podem deformar-se superplasticamente por este processo até cerca de 1000% .

Devido à grande afinidade do Ti com o Oxigénio, este processo decorre em vácuo e numa atmosfera protectora de um gás inerte. O processo de conformação superplástica está firmemente estabelecido na indústria aeroespacial e aeronáutica, e permite a produção de componentes de chapa de parede fina, figuras 3.7. Mesmo para formas mais complexas, não há necessidade de grandes operações de pós – processamento. Os desenvolvimentos recentes passam por tornar este processo mais previsível e controlável através da modelação de algoritmos complexos de controlo [2, 16].

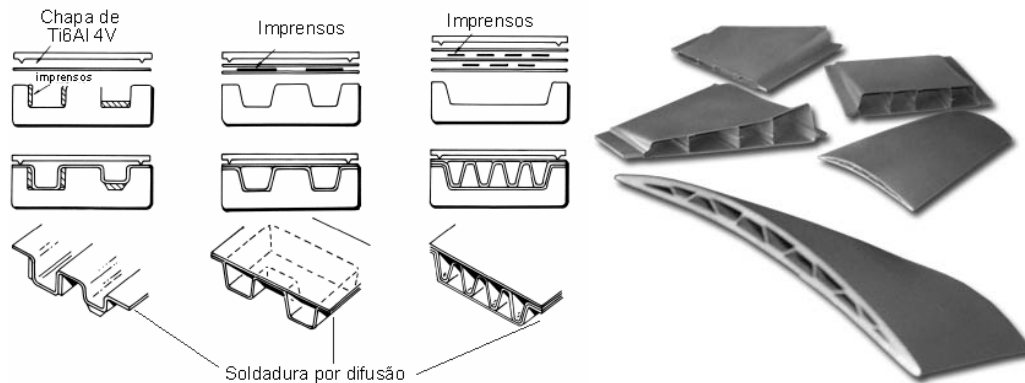



Figura 3.7 - Formas obtidas por conformação superplástica [16]. Exemplo de pás de turbinas de avião obtidas por modelação superplástica [21]

3.2.5 – METALURGIA DE PÓS METÁLICOS

Os processos de produção de formas próximas das formas finais com recurso à metalurgia dos pós, continua a ser uma meta a atingir nas ligas de Ti. Várias técnicas têm sido avançadas como métodos efectivos e eficientes na criação directa de formas finais metálicas funcionais, com propriedades semelhantes às obtidas pelos processos normais. Os avanços nesta área têm sido notáveis e têm-se verificado principalmente nas seguintes áreas [6, 15, 17]:

- Nas técnicas de produção de pós metálicos;
- Novas técnicas de fabrico (por laser e injecção);
- Introdução de melhorias nos processos tradicionais.

Estas técnicas têm especial interesse como processo *near net shape* (NNS), devido à possibilidade que oferecem na obtenção de peças com geometrias significativamente complexas, com pouco desperdício de material. De um modo, geral, a metalurgia dos pós para ser rentável, requer elevados volumes de produção e peças pequenas, devido ao elevado custo dos equipamentos. Uma das preocupações destes métodos prende-se com a qualidade e propriedades finais dos produtos obtidos.

3.2.5.1 - Produção de pós

Estas técnicas podem usar uma mistura de pós – Blended Elemental Powder BE – geralmente de mais baixo custo, e pós pré-ligados – Prealloyed Powders PA – mais dispendiosos mas com melhores resultados a nível de propriedades, podendo mesmos chegar às propriedades dos produtos obtidos por fundição e por processos convencionais.

Os pós de Ti usados actualmente, que resultam do processo de Kroll para produção de esponja, contêm impurezas que impedem o fabrico de componentes 100% densos, com propriedades de fadiga e soldadura reduzidas. Com os novos desenvolvimentos a nível dos processos de extracção e produção de pós (como o processo FFC Cambridge apresentado no ponto 4.2.1.2) espera-se uma melhoria ao nível da qualidade dos pós e a redução de preços. Existe actualmente um projecto da Army Reseach Lab que tem como objectivo a produção de pós metálicos de Ti a partir de aparas da maquinagem usando um processo HDH (hydride/dehydride) [6, 13, 15].

3.2.5.2 - Novas técnicas de fabrico

Recentemente têm sido introduzidos novos processos, ou melhorias aos processos já existentes para a produção de componentes a partir de pós de Ti. Destes destacam-se os processos de fabricação directa de metal por laser e os processos de injecção de pós metálicos como o PIM e o MIM.

Os processos de fabrico através da utilização de laser, derivam directamente dos processos de prototipagem rápida existentes, produzindo peças metálicas funcionais. Estes processos denominados DMLF – Direct Metal Laser Fabrication, podem ser divididos em processos onde ocorre a fusão de metal e processos sem fusão de metal tal como se mostra na figura 3.8 e tabela 3.3 [5].

No caso particular das ligas de Ti, existem referências à produção de componentes metálicos através dos seguintes processos [5]:

- SLS em combinação com HIP - a Universidade do Texas em Austin usando Ti6Al4V consegue produzir por este método, componentes com densidades muito próximas da dos produtos obtidos por processos comuns;
- SLM - existem algumas máquinas a nível industrial a trabalhar com esta tecnologia, alguns exemplos são a Trumaform LM250; MCP Realizer e a LUMEX 25C. Estas máquinas produzem componentes de Ti completamente densos;

- 3D Laser cladding – este é um processo diferente onde em vez de o metal ser fundido numa cama, é depositado através de um jacto. Este processo também é conhecido como LENS – laser engineered net shapes. São vários os projectos que envolvem o fabrico de peças por este processo, desde próteses até pás de turbinas (Rolls Royce e Universidade de Birmingham), tendo sido referidos bons resultados no que diz respeito à densidade das peças finais.

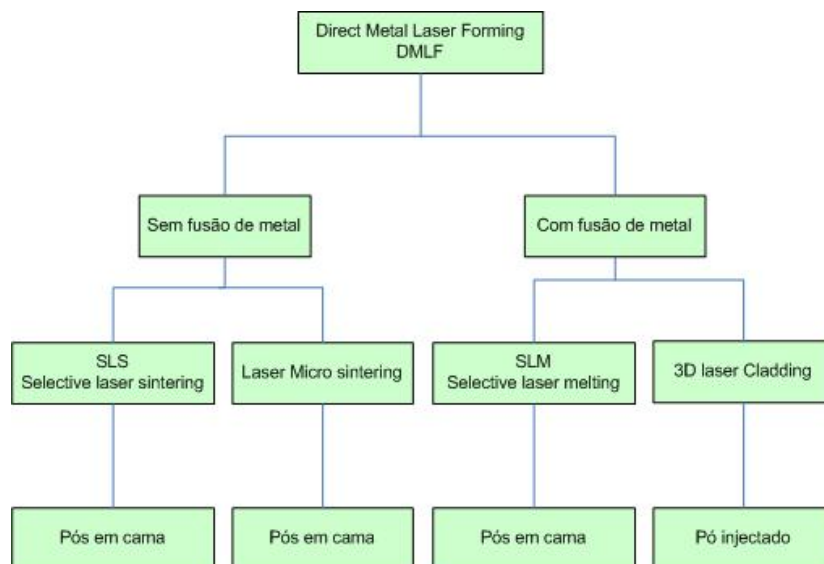



Figura 3.8 – Classificação de métodos de fabrico rápidos de peças metálicas por laser [5].

Tabela 3.3 - Equipamentos comerciais de processos DMLF [5]

Equipamentos	Companhia	Processo
Sinterstation 2000/2500	DTM	DMLS
EOSINT 250 e 270	EOS	DMLS
LUMEX 25C	MATSUURA	SLM
TrumaForm LF 250	TRUMPF	SLM
Realizer figura 3.9	MCP	SLM
Lasform	Aeromet	3D Laser Cladding
LENS 850	Optomec	3D Laser Cladding
Trumaform DMD 505	TRUMPF	3D Laser Cladding

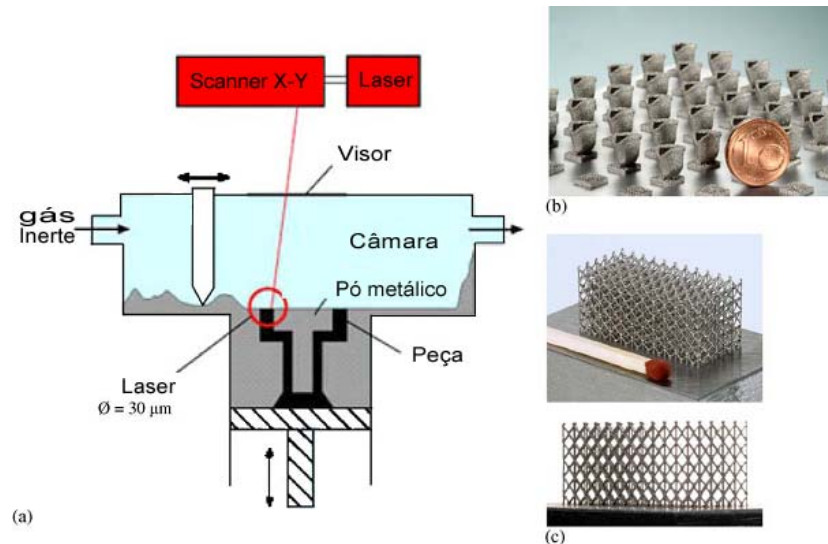



Figura 3.9 – MCP Realizer: a) princípio de funcionamento; b) coroas de dentes em Ti; c) estrutura "airbone" em aço inox [5].

São várias as referências na bibliografia, a peças obtidas pelos processos descritos, com bons resultados do ponto de vista de propriedades e da qualidade final, porém estes processos estão ainda limitados a peças de pequena dimensão. Além do mais, grande parte destas referências, dizem respeito a ambientes universitários ou a projectos de investigação pré-industrial.

A empresa Aeromet oferece no seu sítio na internet produtos fabricados através da técnica 3D Laser Cladding (ao qual chama Lasform, figura 3.10) (apresentado em detalhe mais à frente). A abordagem é semelhante às técnicas de prototipagem rápida, tais como a estereolitografia e o SLS (Selective Laser Sintering), residindo a diferença no facto de que o Lasform permite a obtenção de peças finais metálicas compactas sem o recurso a processos intermédios tais como o HIP.

Este processo está bem adaptado para algumas ligas de Ti, principalmente as que têm propensão para a soldadura. O laser fornece a potência necessária para transferir o pó de Ti fundido para o local onde este vai ser depositado. Todo este processo decorre numa atmosfera de gás inerte livre de oxigénio. Devido a este processo ser baseado na fusão e solidificação localizada do material depositado, o resultado final é muito parecido com o resultado da fundição.

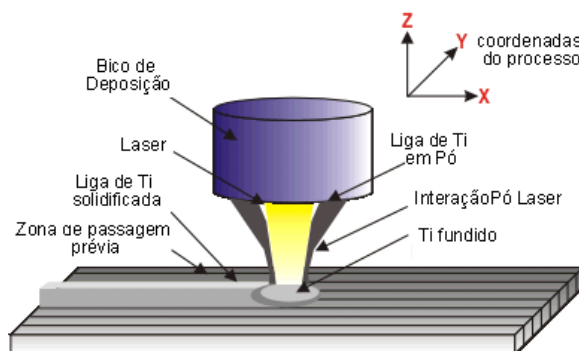



Figura 3.10 – Esquema do processo 3D laser cladding LASFORM [1].

Devido aos rápidos tempos de solidificação, a microestrutura que estes componentes apresentam é muito fina. Isto concede aos componentes produzidos, a resistência, ductilidade e resistência à fractura dos materiais brutos. As propriedades da liga Ti6Al4V obtida por Lasform podem ser vistas na tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas da liga Ti6Al4V obtida pelo processo Lasform e SLS+HIP [1, 5, 9]

Propriedades	Ti 6Al4V Referência	Lasform	SLS + HIP
Resistência à tracção (MPa)	1030	1030	962
Tensão limite de elasticidade (MPa)	925	900	885
Módulo de Young (GPa)	120	-	110

Mas nem todos os componentes ou materiais podem ser obtidos ou utilizados por este processo. Muitas peças são demasiado complexas e/ou vão para além das possibilidades actuais do processo, ou a aplicação a que se destinam obriga a propriedades que o processo ainda não oferece [1, 16].

Os processos de deposição por spray têm um potencial interessante mas é improvável que sejam processos especialmente rentáveis. O elevado custo dos pós de Ti é um ponto negativo nestes processos. Além disso, não é certo que artigos não simétricos possam ser produzidos com o mesmo nível de propriedades que artigos simétricos [8, 15, 16].

O processo MIM – Metal Injection Molding ou PIM – Powder Injection Molding, é um processo análogo ao processo de modelação por injecção de plásticos. É uma tecnologia para peças NNS complexas, de pequena dimensão e de elevados volumes de produção com custos inferiores. Neste processo, pós metálicos são misturados com um ligante e injectados num molde, de onde são posteriormente removidos e

sinterizados. Algumas das limitações do processo prende-se com a reduzida dimensão das peças obtidas, uma vez que devido ás contracções, as peças de maior dimensão tornam-se difíceis de obter sem defeitos geométricos.

A tecnologia PIM actualmente existente é responsável em todo o mundo por cerca de 3 a 5 Ton de peças/mês. Muito do trabalho anteriormente desenvolvido na tentativa de viabilizar o processo PIM foi ao nível de pós, dos ligantes e de fornos de sinterização com atmosferas bem controladas. As melhorias recentes ou em fase de desenvolvimento passam pela melhoria das densidades e das propriedades finais das peças obtidas, através da escolha de ligantes mais adequados a esta tecnologia sem afectar os custos a nível da eficiência económica do processo. O PIM para as ligas de Ti, está posicionado como uma técnica de fabrico de baixo custo e elevado volume de produção [2, 7].

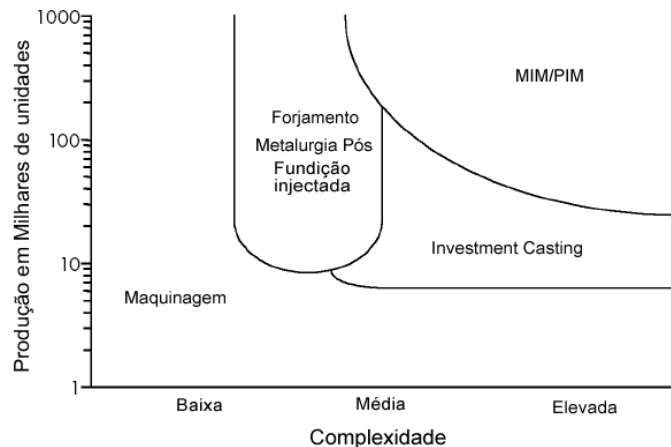



Figura 3.11 - Aplicabilidade do processo PIM e de outros processos de pós metálicos [2].

3.3 – FUNDIÇÃO

Alguns dos avanços na fundição, no que diz respeito ao processo de *"investment casting"* e técnicas de fusão, vão ser referidos no capítulo seguinte com mais pormenor. Este capítulo serve para referir a existência de processos de fundição em moldes metálicos de ligas de Ti, que proporcionam a obtenção de componentes de excelente qualidade microestrutural, sem inclusões cerâmicas e *"α-case"* a preços reduzidos. Porém estão limitados no que diz respeito a formas geométricas e dimensões.

Estes processos de fundição em molde metálico são conhecidos pelos nomes de Vacuum Die Casting - VDC ou Gravity Metal Mold – GMM. São processos semelhantes aos existentes para os metais tradicionais, porém os equipamentos de fusão e vazamento são hermeticamente fechados para evitar a contaminação pelo ar, o que

prejudica os tempos de produção devido à necessidade de evacuar a câmara em cada vazamento. [2, 4].

Ambos os processos eliminam a contaminação e os defeitos devido aos materiais refractários, por não utilizarem moldações cerâmicas. São obtidas peças de grande qualidade a nível da estrutura e das propriedades e é conseguida uma redução de custos significativa devido à eliminação de alguns passos do processo de *"investment Casting"*, contudo os componentes obtidos por estes dois processos têm limitações a nível das geometrias obtidas, da dimensão e do peso limite [2].

Bibliografia capítulo 3

[1].Artigo - Abbott (**1999**). *"Laser forming of titanium alloys."* Material World Vol. 7(6):pag.

[2].Artigo - Brian E. Hurless (**2002**). *"Lowering the Cost of Titanium."* AMPTIAC Vol. 6(2):pag.

[3].Buch (**2006**). *"Meeting the demand challenge"*. International Titanium Association - 22nd Annual Conference &exhibition, San Diego - California, USA, TIMET.

[4].Artigo - Don Larsen (**1999**). *"Vacuum-die casting titanium for aerospace and commercial components "* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 51(6):pag. 26 -27.

[5].Artigo - Edson Costa Santos (**2006**). *"Rapid manufacturing of metal components by laser forming."* Int. Journal of machine tools & manufacture Vol. 46:pag. 1459-1468.

[6].Artigo - F.H. (Sam) Froes (**2007**). *"Cost affordable titanium: the component fabrication perspective."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 59(6):pag. 28-31.

[7].Artigo - froes (**2007**). *"Advances in titanium metal Injection molding."* Powder metallurgy and metal ceramics Vol. 46(5-6):pag. 118-125.

[8].Artigo - Gabel (**1998**). *"The solid-state spray forming of low-oxide titanium components."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society:pag.

[9].Livro - Gerd Lutjering (**2003**). "Titanium", Springer.

[10].Holz (**2006**). *"European Ti market - current and future scenario"*. International Titanium Association - 22nd Annual Conference &exhibition, San Diego, California, USA, Titania Group.

[11].HowmetCorp. www.HowmetCorp.com.

[12].Artigo - Jackson (**2003**). *"How to process cheap titanium."* Advanced Materials & Processes Vol. 161(11):pag. 51-52.

[13].Artigo - Klug (**2004**). *"The Near-Net-Shape manufacturing of affordable titanium componentes for the M777 Lightweight Howitzer."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 56 (11):pag. 35-41.

[14].Lamb (**1975**), "Metal casting", Pat., **Hitchiner Manufacturing Co, Inc**, USA.

[15].Livro - Leyens C. (**2003**). "Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications", WILEY- VCH.

[16].Livro - Matthew J. Donachie (**2000**). "TITANIUM: a technical guide", ASM International.

[17].S. P. Fox (**2003**). *"10th World Conf. on Titanium "*. Ti-2003 Science and Technology, Germany.

[18].Technologies (**2004**), "Summary of emerging titanium cost reduction technologies" US Departmenet of Energy

[19].toho-titanium. (**2008**). www.toho-titanium.co.jp.

[20].US Department of Energy (**2002**), "Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles by EHKT Technologies" US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory.

[21].www.aeromet.co.uk. *"Forming Gallery."*

[22].www.aerospaceweb.org. (**2005**). *"BR 715 Rolls Royce engine."*

CAPÍTULO 4

FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE TITÂNIO

4 – FUNDIÇÃO DAS LIGAS DE TITÂNIO

A fundição tem sido a tecnologia de processamento para as ligas de Ti que maior crescimento conheceu nas últimas décadas, facto para o qual contribuem as vantagens que este processo tecnológico, no geral, oferece relativamente aos outros processos existentes e que são os seguintes [36]:

- Complexidade das formas obtidas;
- Minimização ou eliminação de operações de pós-processamento (maquinagem);
- Similaridade das propriedades mecânicas conseguidas para os fundidos com as dos produtos obtidos por conformação plástica (no caso particular das ligas de Ti esta diferença é muito pequena e por vezes até se conseguem melhores propriedades).

Particularmente no caso das ligas de Ti, estas vantagens reflectem-se no facto da fundição ser uma das alternativas menos dispendiosa de obtenção de componentes. Existe por isso uma crescente e forte procura por parte dos mercados tradicionais e emergentes nesta tecnologia, para peças de grandes dimensões, peças de geometrias complexas e para aplicações tecnológicas de elevada performance. Como resultado, prevê-se o crescimento desta tecnologia nos próximos anos, promovido não só pelas empresas fundidoras, mas também com grande participação dos clientes, tais como os fabricantes da indústria automóvel, indústria aeronáutica e militar [5, 29, 42, 56, 58, 66].

No entanto, a tecnologia da fundição de ligas de Ti apresenta-se como um verdadeiro desafio como consequência das características próprias destas ligas. Assim as principais dificuldades são [9, 53, 58]:

- A elevada temperatura de fusão e vazamento (> 1700ºC p.e. para o Ti6AL4V a liga mais usada industrialmente);

- o Baixa fluidez do metal à temperatura normal de vazamento combinada com baixa densidade;
- o A obtenção de sobreaquecimento (> 100ºC) é quase impossível de ser atingido com as correntes técnicas de fusão;
- o Elevada reactividade com quase todos os elementos (gasosos, sólidos e líquidos), acima dos 500ºC, com destaque para o carbono, oxigénio e azoto.

Uma outra questão relativamente aos componentes obtidos por esta tecnologia diz respeito à fácil formação de defeitos provocados pela fraca fluidez e dificuldade de alimentação de metal durante a solidificação. Devido ao factor económico, a alimentação e os gitos das moldações são muitas vezes minimizados, conduzindo a porosidades e rechupes no interior das peças, principalmente nas peças de maior dimensão.

O elevado grau de exigência dos mercados tradicionais (industrias aeronáutica, automóvel e militar), obriga à realização de tratamentos térmicos sob pressão, o denominado HIP (High Isostatic Pressing). O HIP combina a aplicação de uma pressão isostática de gás (entre 103-206 MPa) a uma determinada temperatura (815 – 980 ºC) numa atmosfera de um gás inerte, para a eliminação de defeitos (porosidades, rechupes), e aumento de densidade, através da combinação de deformação plástica e difusão. A eliminação destes defeitos conduz à melhoria das propriedades mecânicas dos fundidos [33].

Este processo é especialmente apropriado para as ligas de Ti, que devido à sua elevada reactividade a altas temperaturas promove uma fácil soldadura por difusão. A temperatura a que o HIP é realizado para estas ligas, dissolve qualquer microconstituinte depositado nas paredes das superfícies dos poros, levando à cicatrização completa dos defeitos.

A produção de componentes em ligas de Ti através da tecnologia da fundição, requer o uso de recursos e abordagens diferentes e mais sofisticadas que as necessárias na fundição de ligas tradicionais. Por outro lado, as dificuldades técnicas deste processo e os elevados custos de algumas operações de pós – processamento (p.e. o HIP), quando necessárias, aumentam o custo do processo [5, 15, 33, 41, 58, 68].

O aparecimento de novos mercados emergentes, tem contribuído para um esforço colectivo no sentido de reduzir os custos e optimizar este processo de obtenção de

componentes para aplicações comuns. Estes esforços têm-se dirigido principalmente para os seguintes pontos:

- o Materiais e técnicas para fabrico de moldações;
- o Métodos para fusão e vazamento destas ligas.

Concentrando a nossa atenção no segundo ponto, que é relacionado com o tema deste trabalho, têm sido vários os trabalhos apresentados nos últimos anos que têm como tema principal o desenvolvimento de um processo, técnica e economicamente viável de obtenção de ligas de Ti por fundição.

O *"investmente casting"* continua a ser o método preferido e que mais utilização tem tido na obtenção de fundidos de Ti. Uma recente demonstração do potencial de utilização de fundidos de Ti obtidos por *"investment casting"* foi o desenvolvimento de componentes para o morteiro M777, levado a cabo pela parceria entre a Marinha e a Armada Americanas. Neste projecto foram obtidas por fundição, peças estruturais de grande dimensão e livres de defeitos, o que contribuiu para uma significativa redução não só nos custos de obtenção mas também no peso final do morteiro M777, relativamente ao seu antecessor [21, 37].

Outro ponto de grande destaque tem sido a obtenção de componentes fundidos de paredes finas. Neste campo, o objectivo é a produção de componentes em ligas de Ti (Ti6AL4V principalmente) com paredes de secção entre 0.5 – 0.9 mm, o que representa a redução em cerca de 30 a 50% na espessura, comparativamente com o estado actual de arte. O resultados promissores apontam para várias oportunidades de substituição de componentes na industria aeronáutica e automóvel até agora obtidos por fabrico de chapa ou maquinagem, com a redução dos custos finais [8, 20, 58, 63].

4.1 – Processos de fusão e Vazamento

Um processo de fusão e vazamento de ligas de Ti por *"investment casting"* para a obtenção de componentes de paredes finas (processo que está a ser usado no projecto COMTICAST) deve ter em conta os seguintes pontos fundamentais:

- o A elevada reactividade do metal líquido com o oxigénio e o azoto, que obriga à realização da fusão em alto vácuo ou em atmosfera de gás inerte;

- A elevada reactividade com os materiais refractários tradicionais, que obriga à utilização de materiais que sejam inertes ao Ti fundido;
- A baixa fluidez do Ti que obriga à utilização de um processo/método adicional que garanta o enchimento das partes finas dos componentes;
- A porosidade nos fundidos obtidos, resultado da falta de sobreaquecimento ou da turbulência no processo de vazamento/enchimento da moldação [5, 12, 36, 47].

4.1.1 – REACTIVIDADE DO TITÂNIO

As vantagens do recurso ao processo de *"Investment Casting"* para as ligas de Ti são por demais evidentes, como foi visto no início deste capítulo. A elevada reactividade do Ti, faz com que reaja prontamente com elementos como o azoto, carbono e principalmente oxigénio, quer estejam presentes no ar, quer como elementos dos materiais refractários. Esta reacção resulta numa camada superficial composta principalmente por uma estrutura predominantemente de fase α, comummente denominada por "*α-case*" (o oxigénio e o azoto são estabilizadores da fase α como foi visto no capitulo 2). Esta fina camada superficial, que pode chegar a algumas décimas de milímetro é muito dura e frágil, figura 4.1.

A presença de "*α-case*" nos componentes de Ti reduz a sua ductilidade e pode conduzir facilmente ao início de propagação de fissuras de fadiga, reduzindo o tempo de vida destes, caso não seja totalmente removida. No caso especifico do processo de *"investment casting"*, onde uma das características é o excelente acabamento superficial dos componentes, estes podem ser fortemente penalizados.

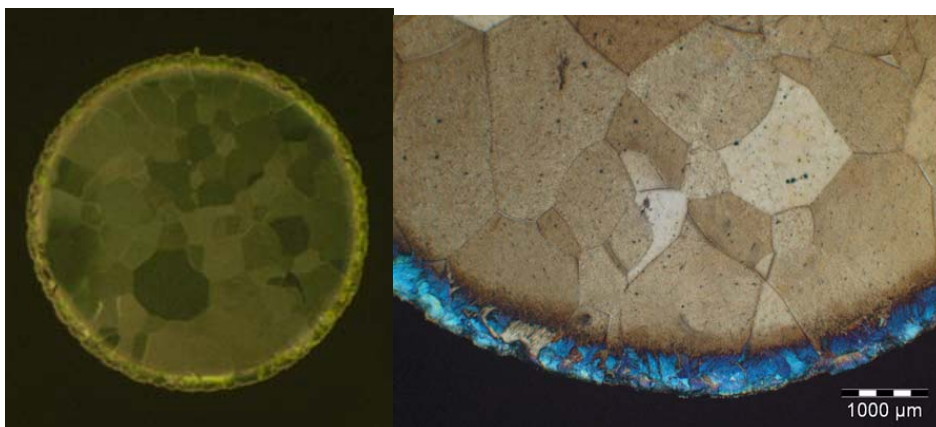



Figura 4.1 - *"α-case"* : num corte de um impulsor, ampliação de uma das zonas onde se vê a diferença entre a camada de *"α-case"* e o restante fundido.

A remoção desta camada pode ser realizada com recurso aos processos normais de acabamentos ou à própria maquinagem. Contudo, estas operações revelam-se extremamente difíceis de realizar devido à elevada dureza que caracteriza o α-case, o que provoca grande desgaste das ferramentas de corte e conduz a processos muito morosos. Também complexo mas contudo mais fácil e rápido do que os processos normais são o recurso ao processo de maquinagem química – *"chemical milling"*. Este processo de acabamento, devido à sua complexidade, envolve sempre o aumento dos custos e tempo na obtenção dos componentes finais [15, 34, 41, 58].

A formação de "*α-case"* depende da estabilidade dos óxidos dos elementos presentes na fusão e vazamento. Por exemplo, a formação de "*α-case"* é muito mais susceptível para o oxigénio (que pode ser dissolvido intersticialmente pelo Ti até 14% em peso) devido à sua mais fácil dissolução no metal, do que para outros elementos. Contudo, basta uma pequena percentagem de um destes elementos para alterar as propriedades superficiais das ligas de Ti.

Como resultado, a manipulação de Ti a elevadas temperaturas tem de ser realizada numa atmosfera de alto vácuo ou gás inerte muito bem controlada. Por outro lado, a escolha dos materiais para o fabrico das moldações passa principalmente pela escolha de materiais que formem óxidos mais estáveis do que o óxido de Ti a altas temperaturas.

Outra questão prende-se com a temperatura da interface entre o metal líquido e a moldação, quanto menor for esta temperatura, menor será a difusão de óxidos no metal. Este parâmetro pode ser influenciado por dois factores: a rapidez da fusão nos cadinhos, e a redução da temperatura de vazamento do metal liquido, para que esta esteja mais próxima da temperatura da moldação e assim diminuir o tempo de contacto entre o metal liquido e a moldação.

Assim, a profundidade da camada de "*α-case"* depende principalmente de dois factores:

- Material da moldação;
- Tempo de contacto metal - cerâmica a temperaturas elevadas.

Como a fusão das ligas de Ti se verifica a altas temperaturas (> 1700ºC para o Ti6AL4V), e a difusão dos vários elementos no Ti ocorre até á temperatura de 500ºC, existe por isso um grande intervalo de temperaturas onde existe contacto metal – cerâmica. Neste sentido, no caso do uso de cadinhos cerâmicos, factores

como a velocidade de arrefecimento ou a velocidade de fusão, são directamente responsáveis pela extensão da camada de *"α-case"* [3, 5, 10, 27, 35, 41, 48, 51-53, 58, 65].

Sendo a elevada dureza uma das características da camada de *"α-case"*, o conhecimento do grau de contaminação nos fundidos de Ti pode ser realizado com recurso à medição das microdurezas ao longo da secção destes, resultando um perfil de microdurezas como pode ser visto na figura 4.2.

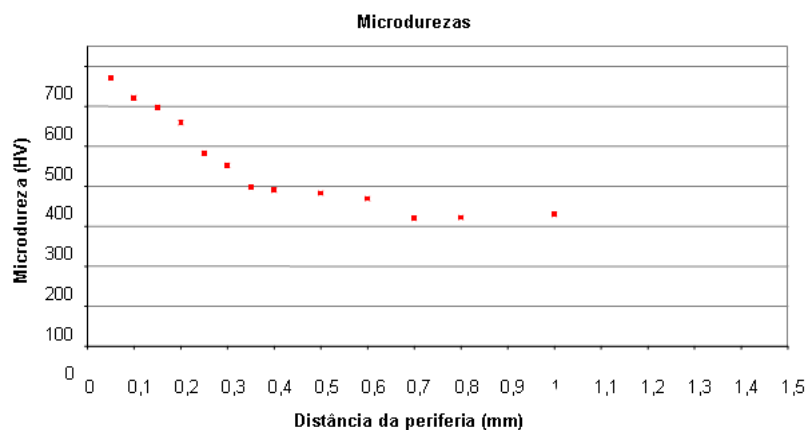



Figura 4.2 – Variação da dureza com a distância à superfície de um componente fundido de Ti onde se verificou a formação de *"α-case"*.

A figura 4.2 mostra um aumento da dureza do centro do fundido para a periferia, podendo-se retirar a profundidade de penetração de elementos no Ti, como sendo a distância a partir da periferia até à zona a partir da qual a dureza mantém um valor constante (na figura é cerca de 0,7mm) [5, 10, 48].

4.1.1.1 – Materiais refractários

O reconhecimento do processo de fundição para obtenção de componentes em ligas de Ti, reflecte-se também no número de trabalhos de investigação e artigos publicados sobre este tema, principalmente no que diz respeito aos materiais cerâmicos quer para moldações quer para cadinhos.

O desenvolvimento de moldações capazes de eliminar o *"α-case"* traria consideráveis ganhos a nível do custo dos fundidos pela eliminação dos passos de acabamentos supra mencionados. Este pode ser um facto pelo qual a maioria dos trabalhos realizados nesta área permanecem como propriedade dos seus autores ou protegidas por patentes, como é o caso das referências [3, 27, 51].

Pelo facto de os materiais de uso comum nas ligas tradicionais não poderem ser utilizados na fusão nas ligas de Ti, muito investigadores recorrem à termodinâmica na identificação dos materiais a utilizar neste processo. Geralmente utilizam a comparação da energia livre de formação do material a utilizar com os produtos de Ti que se possam formar numa possível reacção (tais como TiO, TiO_2). Devem ser considerados materiais cuja energia livre de formação à temperatura de fusão do Ti seja mais negativa do que a do composto de Ti que se possa vir a formar (figura 4.3) [5, 10, 52, 58]. Os factores que influenciam a escolha dos materiais a usar, quer em moldações quer em cadinhos seguem estas mesmas exigências, embora com algumas diferenças.

Enquanto o tempo de contacto metal/cerâmica no cadinho é maior do que no caso da moldação, esta por sua vez tem a desvantagem de na interface com o metal apresentar dois produtos possíveis de contaminação: a cerâmica e o ligante. Este facto advém de o ligante ser completamente removido pela sinterização no caso dos cadinhos, o que não acontece no caso das moldações devido à impossibilidade de se usar temperaturas elevadas de processamento de modo a evitar deformações geométricas e dimensionais [10, 48, 58].

Assim as características que os materiais cerâmicos deverão apresentar para serem passíveis de utilização em cadinhos e moldações são:

- Temperatura de amolecimento bastante superior à temperatura de fusão das ligas de Ti em causa;
- Elevada resistência ao choque térmico, principalmente nos cadinhos, uma vez que dada a elevada reactividade destas ligas a fusão deverá ocorrer tão rápido quanto possível, de modo a minimizar o contacto entre a cerâmica e o metal líquido;
- Termodinamicamente mais estáveis do que o TiO_2;
- Quimicamente inertes, ou tão inertes quanto possível, antes e durante o processamento ou funcionamento.

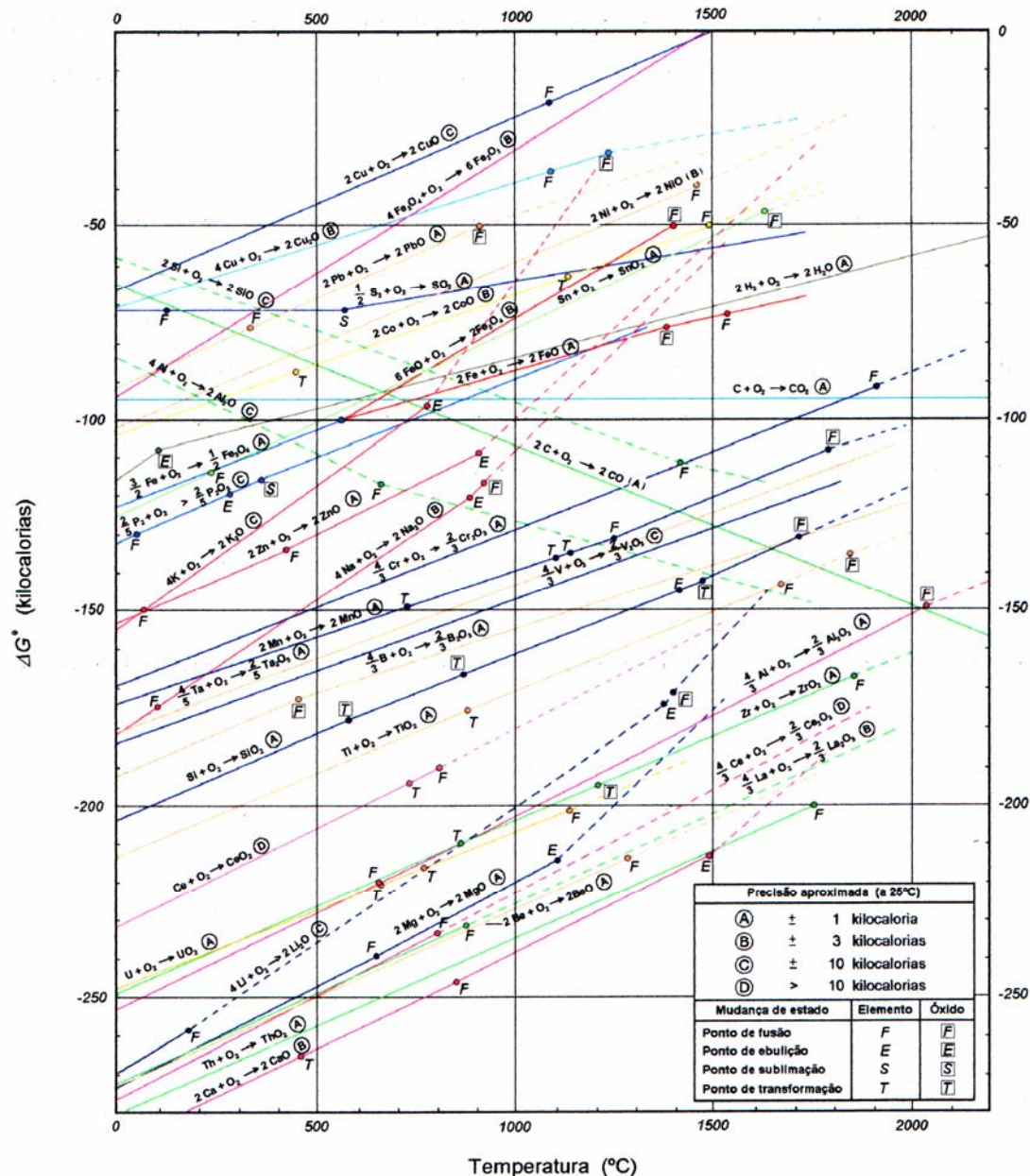



Figura 4.3 – Diagrama de Ellingham para a formação de óxidos de vários elementos [5].

Enquanto as duas primeiras características se aplicam mais aos cadinhos, a última é de igual importância em cadinhos e moldações. A somar a estas, e de uma perspectiva mais industrial existem ainda outros factores a ter em conta na escolha destes materiais, como por exemplo [5]:

- Custo;
- Disponibilidade;
- Não toxicidade, para facilitar/permitir a manipulação;
- Estabilidade das barbotinas ao longo do tempo face ao meio ambiente.

Os melhores resultados no que diz respeito aos valores de contaminação dos fundidos com *“α-case”*, são de cerca e 25 μm, (cerca de 3 μm com 99% de Ítria é o caso de menor espessura reportado [52]), e revelam-se com a utilização de Ítria (óxido de ítrio – Y_2O_3) como material refractário e como ligante sob a forma coloidal. Também para o uso de zircónia (dióxido de zircónio - ZrO_2) estabilizada com Cálcia como refractário e com zircónia coloidal como ligante, foram relatados casos de espessura de *“α-case”* entre 25-75 μm. Outros refractários utilizados e bastante mencionados em estudos e artigos são a Cal (CaO – óxido de cálcio) e a magnésia (MgO – óxido de magnésio), contudo apresentam resultados menos satisfatórios [52].

Os ligantes tradicionalmente usados, à base de sílica (sílica coloidal, silicato de etilo e híbridos à base de sílica) são também referidos como possibilidades, segundo alguns investigadores, com bons resultados (cerca de 250 μm com o uso de sílica coloidal). Os ligantes mais usados, são ligantes à base de zircónia e titânia.

A utilização destes materiais no fabrico de barbotinas é limitada pelo seu elevado custo, mas acima de tudo pelo seu curto tempo de vida antes de ocorrer gelificação, o que acarreta consequências quer na manutenção da própria barbotina quer na própria qualidade superficial dos fundidos, e conduz ao aumento dos custos de produção [10, 21, 27, 51].

4.1.2 – OUTROS DEFEITOS NOS FUNDIDOS DE TITÂNIO

Para além dos defeitos provocados pelos óxidos devidos à reacção com quase todos os elementos, as ligas de Ti também podem ser afectadas em maior ou menor escala pelo processo de fundição utilizado. Aliás, a grande causa de aparecimento de defeitos neste tipo de peças é o processo de fundição e vazamento.

Um destes defeitos está relacionado com o mau enchimento das peças, derivado da falta de fluidez deste material e da dificuldade em atingir o sobreaquecimento necessário para manter o metal líquido até o enchimento completo da moldação. Por outro lado, esta técnica de sobreaquecer o metal, favorece o aparecimento de defeitos causados pela sua reactividade, que devido ao tempo de permanência em contacto com o material da moldação no estado líquido, fica mais sujeito a contaminação [31, 58].

Outro problema relacionado com este tipo de peças, prende-se com a porosidade e rechupes no seu interior. Para além dos factores responsáveis já apontados (falta de fluidez e alimentação deficiente), existem outros mais relacionados com o processo e que são os seguintes [31, 58]:

- Turbulência no enchimento do fundido;
- Porosidade devido à libertação do gás (hidrogénio) aprisionado durante a solidificação;
- Gás existente na câmara de vazamento que devido ao rápido arrefecimento do metal fica no seu interior.

As inclusões são outro dos defeitos que podem surgir nestes fundidos, principalmente no *"investment casting"*, devido a pequenas partículas da moldação que se podem soltar, por várias razões, tais como: má limpeza do interior da moldação, mau manuseamento desta na preparação da fusão ou arrasto durante o vazamento [58].

Apesar de menos importante do que os defeitos anteriormente mencionados, mas que provoca a alteração de algumas propriedades finais dos fundidos, é a percentagem final de oxigénio nestes. O aumento da resistência e dureza, a diminuição da ductilidade, é o principal defeito nas peças obtidas [52, 58].

Assim, na fusão das ligas de Ti, e dependendo da peça final a obter, é importante ponderar sobre os parâmetros de fusão e vazamento a escolher de modo a obter a melhor qualidade possível. Parâmetros tais como o sobreaquecimento, arrefecimento da moldação após fusão ou temperatura da moldação são de extrema importância na qualidade e microestrutura final que é obtida. Outros, como a técnica de vazamento utilizada ou a alimentação das peças são factores bem conhecidos das técnicas de fusão, que nestas ligas devem ser avaliados com especial cuidado.

O recurso à simulação é mencionado como uma técnica de previsão que ajuda na obtenção de fundidos de qualidade [31, 52, 58]. Neste sentido surgiram recentemente algumas normas estabelecidas por várias entidades, tais como, a Força Aérea Americana, FAA (Federal Aviation Administration), as maiores empresas fornecedoras de fundidos de Ti, entre outros, no sentido de ajudarem no projecto de peças para fundição, e nas propriedades a obter [58].

4.2 – PROCESSOS DE FUSÃO E VAZAMENTO ACTUALMENTE UTILIZADOS

Todos os fornos industriais para fusão e vazamento de ligas de Ti têm em comum o uso de uma atmosfera inerte ou alto vácuo. Existem actualmente vários processos de fusão e vazamento de ligas de Ti, uns usados intensivamente, outros mais dedicados a pequenos nichos de mercado. Há ainda alguns novos processos que começam a ganhar relevo mas que devido à protecção a que estão sujeitos, através de patentes p.e., são de domínio exclusivo dos seus proprietários.

Podemos dividir o processo tecnológico de obtenção de fundidos em ligas de Ti em duas partes distintas e de igual complexidade: a fusão e o vazamento. Ambas, de um modo ou de outro, têm influência na forma como as dificuldades apresentadas por estas ligas são ultrapassadas [11, 45, 46]. Assim as técnicas de fusão actuais de maior aplicação para as ligas de Ti são:

- Forno de arco eléctrico
  - De eléctrodo consumível e cadinho de cobre arrefecido – VAR (Vacuum Arc Remelting);
  - De eléctrodo não consumível e cadinho de cobre arrefecido - Electron Beam Melting (EBM) ;
  - Plasma Arc Melting;
- Forno de fusão por indução
  - Em cadinhos frios – Induction Skull Melting (ISM);
  - Em cadinhos cerâmicos – Vacuum Induction Melting (VIM);

A baixa fluidez das ligas de Ti associado ao facto de nenhum dos processos mencionados conseguir um sobreaquecimento do metal desejado para atingir esta fluidez, obriga ao recurso de técnicas auxiliares para o enchimento completo de peças, principalmente em peças de paredes finas. As principais técnicas industriais a que se recorre mais frequentemente para combater estas dificuldades são:

- A centrifugação;
- A contra – gravidade (pressões diferenciais ou não).

Um outro processo que pretendemos expor aqui para o enchimento de peças de paredes finas em ligas de Ti, é a utilização da diferença de pressões entre duas câmaras isoladas por gravidade Este processo tem alguma utilização na obtenção

de próteses dentárias, porém nos processos industriais existem poucas referências à utilização deste processo. Na tabela 4.1, é apresentado um resumo de algumas das características dos processos de fusão e vazamento referidos.

4.2.1 – Forno de arco eléctrico com elétrodo consumível e cadinho de cobre arrefecido - VAR

Este processo consiste na fusão, em vácuo, de um eléctrodo consumível com a mesma composição de material da peça a obter, através de um arco eléctrico que se estabelece entre este e um cadinho de cobre de parede dupla arrefecido a água. O intenso calor provocado pela descarga eléctrica provoca a fusão de parte do eléctrodo que se deposita no cadinho de cobre.

Tabela 4.1 - Processos de fusão e vazamento para as ligas de Ti [36, 40].

<table>
<tr><th colspan="3">Processo de fusão</th><th>Sobreaquecimento</th><th>Alteração composição</th><th>Tipo de vazamento</th><th>Pressão Trabalho (Pa)</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Cadinhos frios</td><td rowspan="2">VAR</td><td>Eléctrodo consumível</td><td>Não</td><td>Baixa</td><td rowspan="2">G; C; PD</td><td rowspan="2">0.1 ~10^5</td></tr>
<tr><td>Eléctrodo permanente</td><td>Não</td><td>Baixa</td></tr>
<tr><td colspan="2">EBM</td><td>Algum, localizado</td><td>Elevada (Al, Sn, Cr)*</td><td>G; C; PD</td><td>10^{-4} ~ 10</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Indução</td><td>Pouco</td><td>Baixa</td><td rowspan="2">G; C; PD; CG</td><td>$<10^5$</td></tr>
<tr><td>Cadinhos cerâmicos</td><td>Sim</td><td>Baixa</td><td>$<10^5$</td></tr>
</table>

LEGENDA:

*- Como são utilizadas elevadas pressões de vácuo, existe o risco da concentração dos elementos mencionados ser reduzida por evaporação.

G – Gravidade; C – centrifugação; PD – Pressões diferenciais; CG – Contragravidade; VAR - Vacuum Arc Remelting; EBM – Electron Beam Melting

Como este cadinho é arrefecido continuamente, o primeiro metal que cai forma uma espécie de carapaça de metal sólido, usualmente chamada “Skull”, que vai funcionar como protecção entre o cadinho e o metal fundido posteriormente. Após a fusão do metal, este é vazado por gravidade (podem ser outros os processos de vazamento) para o interior da moldação que se encontra numa posição inferior. Geralmente estes fornos são equipados com um prato rotativo, onde se coloca a moldação, para permitir o enchimento das peças, figura 4.4 [1, 23, 62, 64].

Os fundidos obtidos por este processo apresentam geralmente baixo grau de contaminação, contudo podem aparecer pequenos defeitos resultantes de inclusões vindas do eléctrodo ou pequenas contaminações devido ao hidrogénio resultante da hidrolise de pequenas quantidades de água, que podem passar através de microfissuras existentes nas paredes de cobre do cadinho.

Durante muitos anos, a obtenção de fundidos de Ti de precisão era apenas realizada com o processo VAR. Actualmente continua a ser o processo mais utilizado, porém apresenta alguns pontos negativos:

- É um processo de obtenção dispendioso;
- Não se consegue o sobreaquecimento do metal liquido devido ao contacto permanente com um cadinho refrigerado, o que torna a tarefa de enchimento de peças pequenas e/ou de paredes finas mais complicada;
- É um processo perigoso devido à possibilidade que existe de o cadinho ser perfurado pelo descontrolo do arco eléctrico ou pelo risco de a água de arrefecimento do cadinho entrar em contacto com o metal líquido [46];
- Dificuldade no controlo do processo de fusão [59];
- Não é possível fazer adições de ligas, estando o processo limitado às ligas existentes no mercado por causa do eléctrodo consumível;
- Exige uma fábrica de eléctrodos;
- É difícil homogeneizai as ligas com uma fusão apenas.

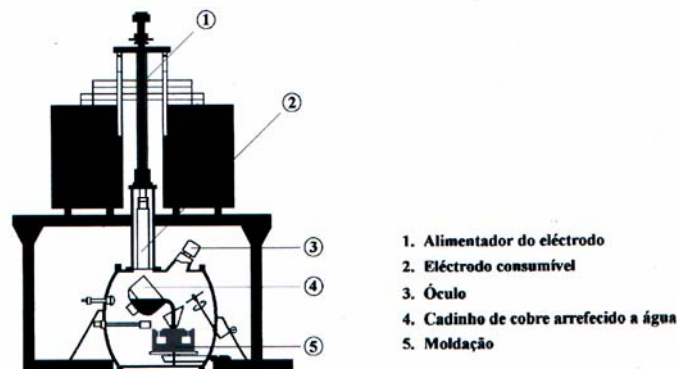



Figura 4.4 – Representação esquemática do processo de fusão por arco eléctrico com eléctrodo consumível [5, 62].

4.2.2 – FORNO DE ARCO ELÉCTRICO COM ELÉCTRODO PERMANENTE E CADINHO DE COBRE ARREFECIDO – EBM

O princípio de funcionamento deste forno, figura 4.5, é semelhante ao anteriormente descrito, o processo decorre em atmosfera controlada (de alto vácuo ou de gás inerte) e usa na mesma um cadinho de cobre refrigerado a água onde se forma uma camada protectora com o primeiro metal a fundir. Porém, a quantidade de metal a fundir é colocada directamente no cadinho de cobre, e pode ter qualquer forma ou mesmo diferentes materiais para produzir a liga desejada.

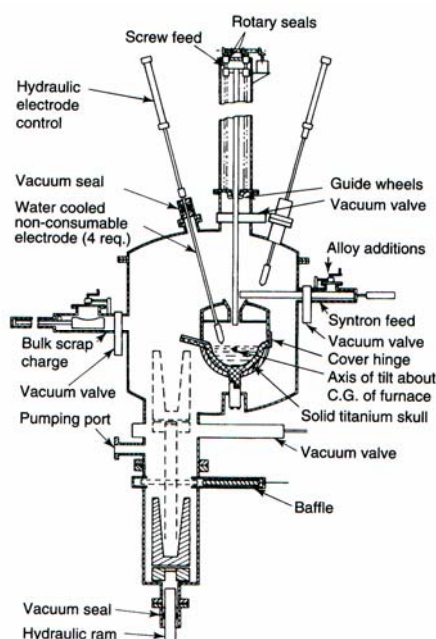



Figura 4.5 - Forno de arco eléctrico de eléctrodo permanente Electron Beam Furnace [6].

Os eléctrodos utilizados são permanentes e são geralmente fabricados em grafite cobre ou tungsténio. A fusão processa-se tal como num forno de eléctrodo consumível, porém neste caso o eléctrodo é animado de um movimento de rotação para evitar a sua fusão [38, 60, 62, 64].

As principais vantagens deste processo relativamente ao anterior são as seguintes [49, 62]:

- O uso de um eléctrodo permanente, permite obter temperaturas de sobreaquecimento do metal fundido mais elevadas, por se conseguir aplicar um arco durante mais tempo ao metal líquido, dependendo da permanência deste no cadinho;

- o Dificuldade em homogenizar a composição química das cargas;
- o Como a carga pode ter varias formas e pode ser feita de vários materiais ou mesmo retornos, os custos de obtenção de matéria - prima são reduzidos, e permite a fusão da liga desejada.

Os pontos negativos deste processo prendem-se com a fraca agitação do banho líquido devido à fusão localizada provocada pelo arco, que dificulta a homogeneização do banho e consequentemente da liga a obter, e os perigos da utilização de um cadinho frio, tal como foi referido para o processo anterior [60]. Outro problema que surge no processo EBM, prende-se com o controlo das ligas a fundir uma vez que devido ao elevado vácuo com que este processo geralmente trabalha, provoca a vaporização de alguns elementos de liga. A produção de fundidos de Ti por EBM é económica quando estão em jogo grandes quantidades com a mesma forma e peso. O processo EBM é superior e mais económico do que o VAR [36, 50, 62].

4.2.3 – Forno de Fusão por Indução

O processo de fusão por indução, figura 4.6, foi desenvolvido para resolver alguns das limitações apresentadas pelos processos anteriores. Este processo utiliza correntes de Eddy induzidas por uma bobine de indução, para aquecer por efeito de Joule o metal a fundir que se encontra no meio desta. As vantagens que este processo, de um modo geral, apresenta sobre os processos anteriormente descritos, são as seguintes [36, 43, 45, 54, 58]:

- o Distribuição mais homogénea do calor no metal, a energia é distribuída no todo o metal porque o calor é gerado dentro deste, e não localizada como no VAR e EBM;
- o Ciclos mais rápidos de fusão;
- o Melhor homogeneização das ligas devido à agitação do campo magnético induzido pela bobine;
- o Maior liberdade na adição de diferentes materiais para fabrico de ligas ou apenas adição de metal. Pode ser adicionado metal directamente ao banho de fusão, o que permite por exemplo o controlo da adição de materiais com diferentes pressões de vaporização;

- A utilização de refugo como carga, que permite custos menores de matéria-prima, associados ao facto de não ser necessário o fabrico de qualquer eléctrodo;
- Maior versatilidade no processo de fusão sem necessidade de recorrer a alterações para a fusão de diferentes materiais consecutivamente (principalmente nos cadinhos frios);
- Há várias referências à produção de fundidos de espessura da ordem de 1,5 - 2 mm, em vazamento por gravidade.

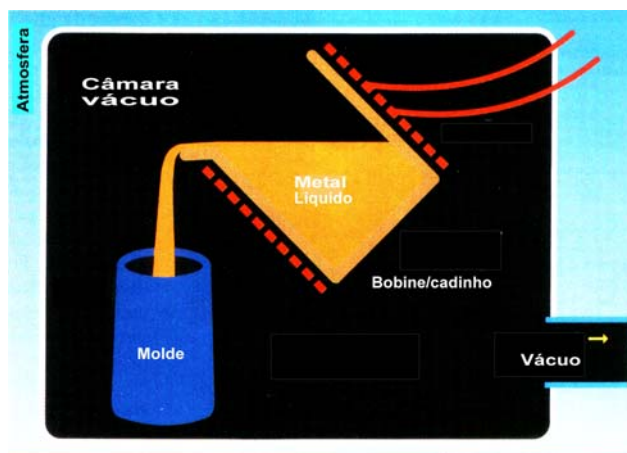



Figura 4.6 – Representação esquemática de um forno de indução em vácuo.

Este processo apresenta duas soluções para a fusão do metal: os cadinhos frios, o processo mais utilizado e mais recentemente os cadinhos cerâmicos.

4.2.3.1 – Forno de fusão por indução em cadinhos frios

O cadinho refrigerado a água utilizado nestes fornos, tal como nos processos anteriormente descritos, serve para suster o metal antes do vazamento, até este estar completamente no estado líquido, evitando assim sua contaminação. Contudo, os cadinhos utilizados nestes processos são segmentados, o que permite uma maior concentração da potência induzida no metal colocado no seu interior. Sem os segmentos, a indução da bobine serviria apenas para aquecer ou fundir o cobre do cadinho, figuras 4.7 e 4.8. Também neste processo se forma uma pequena camada de Ti, que arrefece por encosto às paredes do cadinho, formando uma cavidade (o “skull”) onde o restante metal fundido permanece até ser vazado [43, 45].

Neste tipo de forno consegue-se manter o metal em estado liquido durante mais tempo, devido à pequena variação de temperatura no metal, permitindo assim

temperaturas de sobreaquecimento mais elevadas do que nos processos VAR e EBM [6, 43].

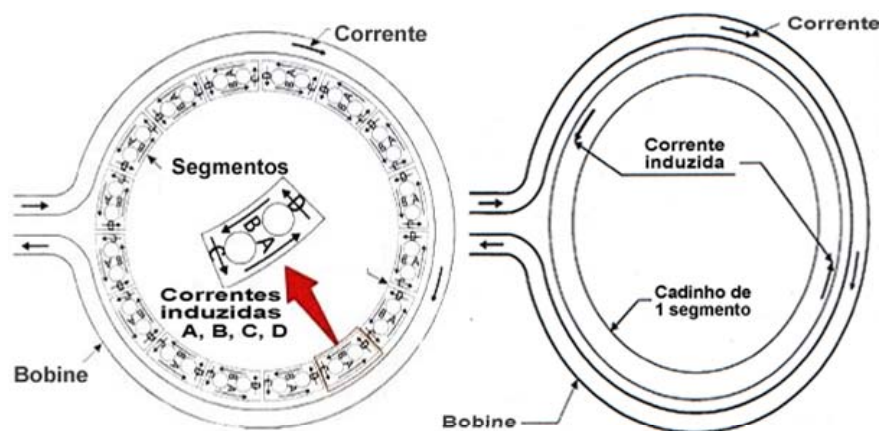



Figura 4.7 - Diferença entre a corrente induzida num cadinho segmentado típico de um cadinho frio e num cadinho de cobre inteiro [4, 7].

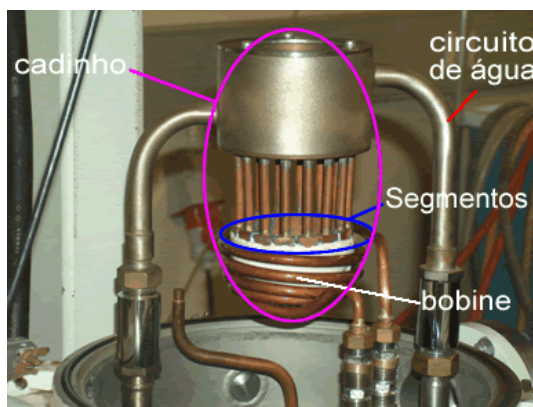



Figura 4.8 – Cadinho de cobre arrefecido com água de um forno de fusão.

Apesar deste processo apresentar significativas vantagens em relação aos processos por arco eléctrico e para além dos perigos de usar um cadinho frio como foi referido atrás, apresenta também algumas limitações ou aspectos negativos [2, 4, 32]:

- Elevado custo de equipamento e de manutenção (substituição do cadinho);
- Grandes dimensões da instalação;
- Apesar de maior do que nos processos por arco, o sobreaquecimento conseguido não é suficiente, uma vez que parte da potência fornecida pela bobine perde-se para o cadinho de cobre.

Devido aos elevados custos de operação e manutenção destas unidades, este é um processo de uso quase exclusivo de fundições com alguma capacidade financeira. Apesar disso, as potencialidades deste processo de fusão são reconhecidas e fazem com que seja o processo mais utilizado para a fusão de ligas reactivas, e também

aquele que mais protegido está, sob a forma de patentes, pelas empresas que o comercializam.

4.2.3.2 – Forno de fusão por indução em cadinhos cerâmicos

A fusão por indução com recurso a cadinhos cerâmicos tem sido nos últimos anos alvo de grande atenção, principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de cadinhos cerâmicos para uso na fusão de metais reactivos. A maioria das referências que existem à utilização deste processo em ligas de Ti, referem-se a pequenas utilizações laboratoriais. Existem também algumas referências a nível de utilizações industriais, mas neste capítulo os resultados dos fundidos são desconhecidos, ou o nível de qualidade dos fundidos obtidos não é crítico para a aplicação em causa. Um exemplo é a Hitchiner, que no seu processo de fusão por contragravidade assistido por vácuo, utiliza um cadinho cerâmico para a fusão do metal, (este processo será abordado mais à frente neste trabalho) [55].

A falta de um material refractário capaz de aguentar o choque térmico produzido pela fusão a altas temperaturas num curto espaço de tempo, sem que contamine o fundido obtido, tem sido o grande responsável pela falta de desenvolvimento deste processo a nível industrial. Se a questão dos cadinhos for resolvida, a utilização deste processo vai certamente generalizar-se nas aplicações industriais, uma vez que apresenta várias vantagens face aos cadinhos frios:

- Menor custo do equipamento;
- Menor espaço físico para a sua implementação;
- Maior temperatura de sobreaquecimento conseguida por não haver perdas para o cadinho de cobre;
- Maior segurança no processo, porque o risco de contacto da água do cadinho é menor;
- Maior facilidade no controlo da temperatura devido à inexistência do cadinho frio.

4.2.4 – PROCESSOS DE VAZAMENTO

Foi já referido neste trabalho que existem relatos de vazamentos de peças por gravidade da ordem do 1,5 – 2 mm de espessura. Este processo é usado com sucesso no vazamento de peças de paredes espessas, p.e componentes estruturais

para a indústria militar [37]. Também já foi referido que a falta de fluidez das ligas de Ti, obriga à utilização de processos auxiliares de vazamento para promover o enchimento completo de peças de paredes finas. Na tecnologia da fundição existem vários processos usados no vazamento de ligas comuns que promovem o enchimento de peças com formas mais complexas. Desses processos, os seguintes têm sido usados no vazamento ligas de Ti para peças com as características referidas atrás:

- Centrifugação;
- Baixa pressão por contragravidade;
- Diferencial de pressões.

Alguns destes processos, aliados às técnicas de fusão que referidas atrás, estão protegidos por patentes, o que de certo modo inviabilizam o seu uso em termos industriais por obrigarem ao pagamento de "royalties" aos seus detentores.

4.2.4.1 – Vazamento por centrifugação

A utilização em ambiente industrial da técnica de vazamento por centrifugação remonta ao ano de 1848. Existem duas técnicas de vazamento por centrifugação: a centrifugação horizontal e a centrifugação vertical, em que a diferença reside no facto do eixo de rotação ser respectivamente horizontal ou vertical. Enquanto a primeira é mais dedicada ao fabrico de formas tubulares e cilíndricas, a segunda tem uma extensão de aplicações e formas mais vasto. Na centrifugação vertical pode ainda distinguir-se o vazamento no eixo de rotação, e afastado do eixo de rotação (muitos autores distinguem estes dois tipos de vazamento como vertical e horizontal dependendo da direcção da força de enchimento) figuras 4.9 e 4.10.

No vazamento por centrifugação vertical (no eixo de rotação) o metal é vazado numa moldação, constituída por um cilindro central onde estão fixas as cavidades das formas a obter, que está animada de um movimento de rotação. A força centrifuga gerada pela rotação da moldação em torno do eixo do seu cilindro central, projecta o metal contra as paredes da moldação e obriga as cavidades a encher. O movimento de rotação mantém-se até o metal solidificar sob o efeito da pressão gerada pela centrifugação, figura 4.9 [6, 57]. No vazamento por centrifugação afastado do eixo de rotação, a diferença está no facto do cadinho estar fixo à moldação e o conjunto ser todo ele animado do movimento de rotação figura 4.10 [36].

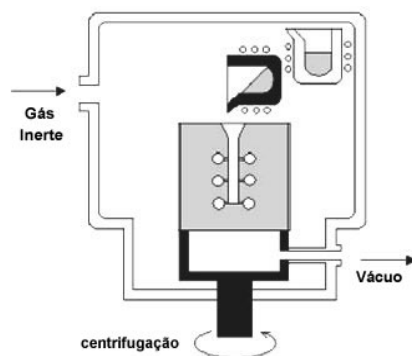



Figura 4.9 - Esquema de método de vazamento por centrifugação vertical com força centrifuga vertical [28].

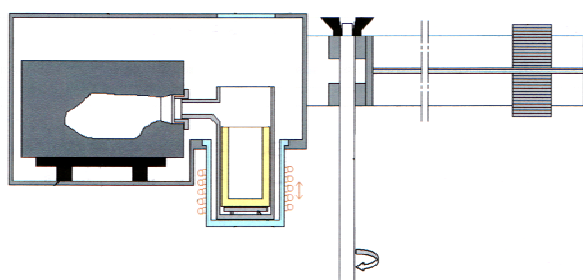



Figura 4.10 – Esquema de método de vazamento por centrifugação vertical com força centrifuga horizontal [5].

A força centrífuga produzida neste processo é maior do que a força hidrostática normalmente presente nos vazamentos por gravidade e é utilizada de duas maneiras distintas: distribuir o metal pelas cavidades, aumentar a velocidade e pressão de enchimento das peças e aplicar uma pressão elevada durante o arrefecimento.

Estas duas características do processo vão determinar as vantagens que lhe são reconhecidas [4, 6, 36, 57]:

- Elevada qualidade metalúrgica dos fundidos devido à solidificação direccionada, que proporciona as mesmas propriedades em todas as direcções;
- Peças sem rechupes devido à pressão constante que está presente durante a solidificação;
- A força centrifuga ajuda na alimentação do metal às peças, o que diminui a necessidade de alimentadores e arrefecedores;
- Economia no metal, se a quantidade de metal for bem calculada pode-se poupar parte do metal que encheria o gito da moldação, figura 4.11 [4];

- Tendência para as inclusões não metálicas mais leves e gases ficarem no eixo de rotação.

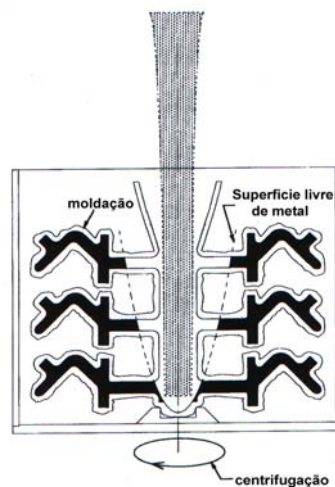



Figura 4.11 - Superfície parabólica livre de metal líquido durante a centrifugação [4].

Esta é a técnica de vazamento mais usada actualmente no vazamento deste tipo de ligas, exemplos disso são o processo Taramm, desenvolvido pela empresa francesa com o mesmo nome, e o forno ISM (Induction Skull Melting) desenvolvido pela Consarc, figura 4.12.

Figura 4.12 - Forno ISM (Induction SKull Melting) com prato rotativo para vazamento por centrifugação, comercializado pela Consarc [13].

Ambos os processo combinam a fusão do metal num cadinho de cobre refrigerado, associado ao vazamento por "single shot" para a moldação que está animada de um movimento de rotação. O forno Taramm tem actualmente capacidade de fusão de 2kg de Ti e o Consarc de 5Kg do mesmo metal.

4.2.4.1 – Vazamento por contragravidade

O vazamento normal por gravidade é propício à criação de defeitos devido à turbulência do metal no enchimento de peças gerado pela queda do metal. Apesar

disso é menos turbulento do que a alta velocidade típica do processo de centrifugação. Apesar das atmosferas inertes criadas para a fusão e vazamento destas ligas, não se consegue criar uma atmosfera tão inerte que elimine por completo a formação de óxidos no enchimento e assim, a turbulência no enchimento continua a ser um problema.

O processo por contragravidade é conhecido pela baixa turbulência no enchimento e por o fluxo de metal ser promovido na direcção do enchimento das peças, o que conduz a fundidos de muito boa qualidade e com menos inclusões [12]. Existem várias alternativas para o processo contragravidade na fusão de ligas convencionais que são geralmente conhecidos pelos seus anacronismos:

CLA – Vazamento de metais ao ar por baixa pressão e em contragravidade;

CLV - Vazamento de metais em vácuo por baixa pressão e em contragravidade;

CLI – Vazamento de metais em atmosfera de gás inerte por baixa pressão e em contragravidade

CV – Vazamento em contragravidade com recurso a uma *“check valve”;*

CLAS - Vazamento de metais por baixa pressão e em contragravidade numa moldação em areia.

Dos processos apresentados, apenas o CLV e o CLI têm interesse na fusão de ligas reactivas, pelo facto de o processo fusão e vazamento serem realizados em atmosfera de gás inerte.

As vantagens que estes processos trazem no vazamento destas ligas são os seguintes [11, 12]:

- Economia no material, o alimentador da moldação é dimensionado de modo a que esta solidifique primeiro do que o alimentador, assim o material que não é usado cai novamente no banho;

- O fabrico de fundidos de paredes finas, da ordem dos 0.5 mm e de grandes áreas é facilmente conseguido, e a baixo custo;

- Diminuição de óxidos formados durante o enchimento das peças, e que são normais nos vazamento por gravidade, devido ao enchimento progressivo e controlado;

- Redução no material e no tempo de fabrico de moldações. A câmara que suporta a moldação pode ser cheia de areia e assim permitir que as moldações sejam mais finas e o tempo de fabrico seja mais curto;

- A ajuda no escoamento através da utilização de vácuo não exige uma temperatura de sobreaquecimento tão elevada do metal, o que conduz a microestruturas mais refinadas e menos tempo de contacto entre o metal líquido e a moldação.

No processo CLV, uma câmara (câmara de vazamento) onde é colocada a moldação aquecida é posicionada sobre uma outra câmara (câmara de fusão) onde o metal é fundido. A ligação entre as duas câmaras é feita através de um bocal na câmara de fusão. Em ambas as câmaras é feito primeiro vácuo, e depois injectado árgon. Quando o metal funde, o bocal é aberto para deixar entrar um tubo que mergulha no metal líquido, e é iniciado o vácuo na câmara da moldação que obriga o metal a subir pelo tubo e a encher a moldação. Depois de todo o metal da moldação solidificar, o metal abaixo do alimentador cai de novo para o banho, figura 4.13 [6, 11, 12].

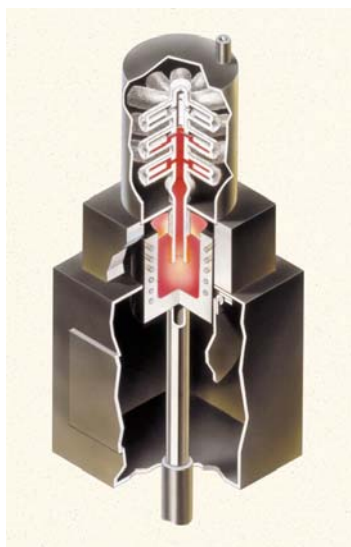



Figura 4.13- Processo CLV usado pela Hitchiner [25].

O princípio de funcionamento do processo CLI, segue o mesmo princípio do processo descrito anteriormente, porém apenas na câmara de fusão é realizado vácuo seguido do enchimento da mesma com árgon, figura 4.14. Quando a câmara da moldação é ligada á câmara de fusão, a primeira, aspira primeiro o árgon existente na câmara de fusão para a limpar e só depois o tubo aspira o metal líquido por mergulho neste, tal como acontece no CLV. Este processo permite tempos mais

rápidos de fusão e vazamento e custos mais reduzidos devido ao menor consumo de árgon [11].

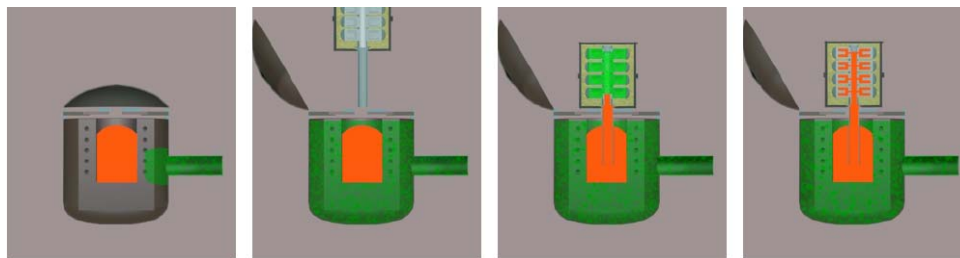



Figura 4.14 - Etapas do processo CLI usado pela Hitchiner [25].

Um dos pontos negativos destes processos é o tubo utilizado na alimentação do material líquido à moldação. Este tubo de enchimento, no caso das ligas de Ti, tem de suportar a temperatura do Ti líquido (> 1700 ºC) sem o contaminar e consequentemente provocar o aparecimento de *"α-case"* ou outras inclusões nos fundidos.

Existem actualmente alguns processos industriais a usar a contragravidade no enchimento de fundidos em ligas de Ti, a Hitchiner Manufacturing, CO (USA) e a Daido Tokushuko (Japão).

A Hitchiner usa ambos os processos (CLV e CLI) na fusão e vazamento de ligas reactivas. Para a fusão do metal, a Hitchiner anuncia o uso de cadinhos cerâmicos em ambos os processos [55]. No CLI, de modo proteger o banho de metal líquido no processo de vazamento, é usada uma técnica patenteada, que consiste numa espécie de cobertor de árgon sobre a zona exposta. Este processo de fusão e vazamento está protegido por patentes [44, 55].

O processo usado pela Daido é em quase tudo semelhante ao descrito anteriormente, porém usa cadinhos de cobre refrigerados desenvolvidos internamente [17]. Um outro ponto distinto deste processo é o facto de poder trabalhar com alimentação constante de metal em forma de barra ao cadinho frio [26]. Este processo da Daido é conhecido mundialmente por Levi Cast, ver figura 4.15. No seu sítio na Internet, a Daido anuncia a comercialização de peças tal como tacos de golfe, próteses em ligas de Ti e turbinas em TiAl. A Daido tem vindo a desenvolver este tipo de vazamento, e a prová-lo estão as inúmeras patentes registadas em processos, equipamentos e cadinhos [16, 18, 26, 30, 67].

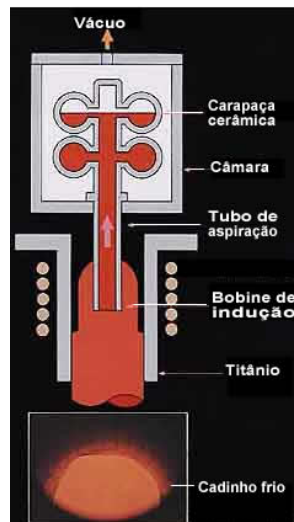



Figura 4.15 - Processo Levi Cast desenvolvido pela Daido (Japão) [14].

4.2.4.3 – Vazamento por *“single shot”* com diferencial de pressões entre duas câmaras

O processo de fusão e vazamento por *“single shot”* com diferencial de pressões entre duas câmaras, é um processo comum dos fornos utilizados na produção de peças em Ti na medicina dentária, para a produção de próteses dentárias, e na ourivesaria.

Estes processos utilizam duas câmaras posicionadas, uma sobre a outra, na vertical, e ligadas entre si por um pequeno orifício central, figura 4.16.

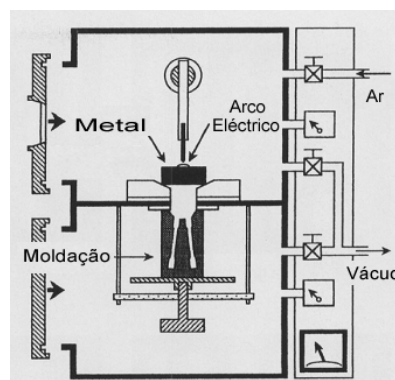



Figura 4.16 - Processo de pressões diferenciais usado na fusão próteses dentárias [61].

A câmara superior é utilizada para a fusão do metal, geralmente poucas gramas, por arco eléctrico (também pode ser por indução) num cadinho de cobre refrigerado. A câmara inferior, para o vazamento, serve para colocar a moldação que vai receber o metal. Com as câmaras fechadas, faz-se vácuo em ambas as câmaras, que se encontram ligadas através do orifício.

Depois de completamente fundido, o metal é vazado para a moldação, sendo fechada a ligação entre as duas câmaras. Como o vácuo está a ser directamente

aplicado na câmara inferior, o metal é obrigado a encher a cavidade da moldação figura 4.17.

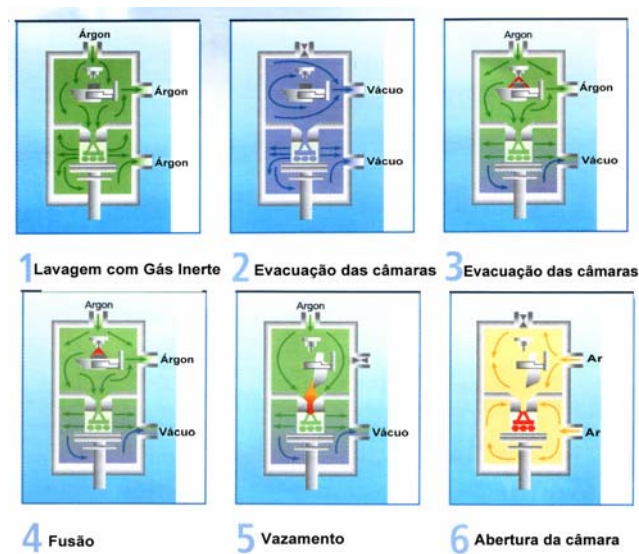



Figura 4.17 - Etapas do processo de fusão e vazamento de um forno para próteses dentárias [19].

Industrialmente existem alguns processos a trabalhar com diferencial de pressões entre duas câmaras, não só por *"single shot"* vertical mas também em contragravidade. Quer a Daido como a Hitchiner, possuem patentes para um sistema do primeiro tipo, [30] e [22] respectivamente, enquanto a Hitchiner possui uma para um sistema do segundo tipo [39].

O princípio de funcionamento destes processos não difere muito do processo usado nas próteses dentárias e joalharia. Contudo nos processos industriais para além do uso de indução na fusão do metal, a diferença de pressões entre as duas câmaras é conseguida através da vedação da passagem entre elas com recurso a uma das seguintes técnicas:

- Válvula construída para o efeito;
- Disco metálico com a mesma liga a fundir ou elemento de liga a incluir;
- Próprio metal a fundir.

A fusão do metal por indução pode ser realizada através da utilização de cadinhos frios ou de cadinhos cerâmicos.

Este processo é especialmente usado na produção de peças de espessura muito fina e onde se pretendem vazamentos muito rápidos de modo a evitar o arrefecimento do metal líquido, e assim evitar peças mal cheias. Neste processo, o

ajuste de pressões entre as duas câmaras é um ponto crítico e vai influenciar a sanidade dos fundidos obtidos.

A técnica de *“single shot”* associada à diferença de pressões, oferece um processo muito flexível e de baixo custo para a fusão de metais reactivos, com cadências de produção bastante elevadas.

Algumas das vantagens que deste processo de *“single shot”* associado à diferença de pressões oferece são [24, 36, 47, 61]:

- A velocidade de vazamento diminui o tempo de arrefecimento do metal entre a fusão e o vazamento, com benefícios do ponto de vista metalúrgico e do enchimento;
- Processo flexível porque permite alterar as bobines de indução com grande facilidade e sem alterações ao sistema e ajustar a quantidade de metal a fundir (desde que as dimensões do metal a fundir estejam ajustadas à bobine de indução existente);
- Redução no espaço de instalação destes sistemas. São sistemas de pequena dimensão;
- Grandes cadências de produção – por ser um sistema flexível;
- Processo económico do ponto de vista do material usado. Pode usar qualquer tipo de carga metálica, desde chapa, barra cilíndrica ou quadrada, tornando-se especialmente interessante no uso de retornos de chapa ou outros retornos derivados de trabalho a frio, por estarem menos contaminados e serem uma fonte de matéria-prima de qualidade, a mais baixo custo.

Industrialmente existem poucas referências sobre a qualidade dos fundidos obtidos por um processo de pressões diferenciais entre duas câmaras. Ao nível da fusão de pequenas quantidades por diferencial de pressões, estudos levados a cabo na área da medicina dentária, concluem que o enchimento de peças de parede fina não constitui problema, contudo são relatadas porosidades nos fundidos obtidos. Também se refere que estes problemas podem ser minimizados através do ajuste do diferencial de pressões entre câmaras, (quanto menor melhor), e da redução do diferencial de temperaturas entre a moldação e o metal no momento do vazamento, pré aquecendo a moldação [61].

4.3 – SEGURANÇA NA FUSÃO DE TI

Nos capítulos anteriores falou-se muito sobre a segurança nos processos de fusão de Ti onde são usados cadinhos, segmentados ou não, para manuseamento do metal líquido antes do vazamento. Pretende-se com este ponto dar a conhecer algum trabalho realizado, principalmente nos EUA. A informação disponível sobre este assunto, diz respeito à fusão de esponja de Ti para o fabrico de lingotes, contudo pensa-se ser pertinente apresentar alguns factos e medidas que envolvem este processo, que acarreta risco se não forem tomadas as devidas precauções.

Nos finais de 1999, a indústria do Ti a nível mundial produzia mais de 45 mil tons por ano. Vários problemas surgiam relacionados com a operação de fornos de fusão de Ti, principalmente pele falta de conhecimentos no que diz respeito ao projecto e procedimentos de operação destes fornos. Os conhecimentos existentes eram baseados na tecnologia utilizada para as ligas de aço, e as explosões provocadas pelo hidrogénio eram completamente novas. Outros problemas que frequentemente apareciam eram relacionados com: explosões e fogos provocados pela esponja e pós de Ti resultantes do seu manuseamento e problemas relacionados com a inalação dos gases usados na limpeza das câmaras de fusão. O primeiro problema é aquele que se pretende aqui abordar por poder estar presente em vários processos secundários de obtenção de fundidos em ligas de Ti.

Quando a água contacta com o Ti no estado líquido, vaporiza. Como o Ti tem grande afinidade com o oxigénio, quebra a molécula da água, absorve o oxigénio e liberta o hidrogénio. O hidrogénio é auto – detonante a partir de pequenas concentrações (cerca de 4%). Nestas circunstâncias, explosões devidas ao hidrogénio e também ao vapor de água são possíveis.

O Ti funde a 1635ºC, se assumir o sobreaquecimento do metal no estado liquido da ordem dos 200ºC, a temperatura de operação é de cerca de 1800ºC. Este metal está contido num cadinho de cobre arrefecido a água. O cobre funde a 1100ºC, se a água por alguma razão falhar o cadinho funde. Também podem ocorrer fugas de água, que provocam dois tipos de explosões: a primeira devido ao vapor que é depois seguida por uma explosão devida à presença de hidrogénio.

O primeiro comité que estabeleceu as primeiras *“guidelines”* para o projecto e modo de funcionamento deste tipo de equipamento, e que foi adoptado pela indústria, apareceu nos finais de 1950 e diluiu-se em 1965. Porém muitas destas *“guidelines”*

continuam em uso e foram mais tarde adoptadas. Mais tarde, um conjunto das maiores companhias a trabalharem na produção de produtos semi-acabados de Ti, juntaram-se e fundaram um comité de segurança (em 1992) de onde surgiu um documento com um conjunto de normas a adoptar no fabrico e operação destes equipamentos. Estas normas podem ser vistas no anexo A [46].

Bibliografia capítulo 4

[1].AG, *Catálogo - Vacuum Arc Remelting (VAR)* 2003.

[2].AG, *Vacuum Induction Melting and Casting Furnaces*, ALD, Editor. 2003.

[3].Alexander (**1996**), "Ceramic material for use in reactive metals", Pat., **PCC Airfoils, Inc**, USA.

[4].Artigo - Bannister (**2000**). *"Using cold-crucible melting for titanium precision castings."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 52(5):pag. 21 - 23.

[5].Barbosa (**2001**), *"Elaboração de Aluminetos de Titânio por fusão de indução em cadinho cerâmico e vazamento em moldação cerâmica",* Grau:Doutoramento, Universidade do Minho, Engenharia Mecânica.

[6].Livro - Beeley (**2001**). "Foundry Technology".

[7].Artigo - Braihanne (**2000**). *"A new spin on titanium casting Technology "* Materials Wordl Vol. 8(8):pag. 21-28.

[8].Artigo - Brian E. Hurless (**2002**). *"Lowering the Cost of Titanium."* AMPTIAC Vol. 6(2):pag.

[9].Artigo - C. Frueh (**1996**). *"Attempts to develop a ceramic mould for titanium casting - a review."* International Journal Cast Metals (9):pag. 233-239.

[10].Artigo - C. Frueh (**1996**). *"Attempts to develop a ceramic mould for titanium casting - a review."* International Journal Cast Metals (9):pag. 233-239.

[11].Livro - Chandley (**1992**). "Counter-gravity Low-pressure Casting", ASM International, A. Handbook, 15.

[12].Artigo - Chandley (**1999**). *"Use of vacuum for counter-gravity casting of metals."* Mat Res Innovat (3):pag. 14-23.

[13].Corp. (**2004**). *"Titanium ISM furnace."* www.consarc.com.

[14].Daido Steel Co. (**2008**). *"Levi Cast (countergravity vacuum casting)."* www.daido.co.jp.

[15].Livro - Daniel Eylon (**1990**). "Titanium and titanium alloys castings", ASM International, 2.

[16].Demikai (**1996**), "A levitation melting method and a levitation melting and casting device", Pat., **Daido**, Japão.

[17].Demukai (**1996**), "Levitation melting crucible", Pat. Nº:EP 0,743,806 A2, **Daido Tokushuko** Japão.

[18].Demukai (**1996**), "Method of casting metal and apparatus therefor", Pat. Nº:EP 0,739,667 A1 **Daido**, Japão.

[19].Dentaurum *"Catálogo Dentaurum"*,pag.

[20].Artigo - Don Larsen (**1999**). *"Vacuum-die casting titanium for aerospace and commercial components "* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 51(6):pag. 26 -27.

[21].Artigo - F.H. (Sam) Froes (**2007**). *"Cost affordable titanium: the component fabrication perspective."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 59(6):pag. 28-31.

[22].George D. Chandley; Amherst (**1992**), "Countergravity casting method and apparatus", Pat., **Hitchiner Manufactoring Co, Inc**, USA.

[23].Livro - Gerd Lutjering (**2003**). "Titanium", Springer.

[24].Artigo - Gibson (**1998**). *"Induction heating for single shot melting processes."* Foundryman Vol. 91(23):pag. 23-28.

[25].Hitchiner Manufacturing CO., *Reactive Alloy Casting Process - Vacuum- and inert gas-melt and cast solutions for the gas turbine industry*. 2001.

[26].Hitotsuyanagi (**1993**), "Method for precision casting of titanium or titanium alloy", Pat. Nº:US 5,193,607, **Daido Tokushuko**, Japão.

[27].Horton (**1993**), "Method of casting a reactive metal against a surface formed from an improved slurry containing Ytria", Pat., **PCC Airfoils, Inc**, USA.

[28].http://www.mec.cf.ac.uk/.

[29].Livro - International (**1992**). "Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials", ASM International.

[30].Isobe (**1990**), "Method and apparatus for casting a metal", Pat. Nº:0,387,107 A2, **Daido**, Japão.

[31].Artigo - J. D. Cotton (**2006**). *"Titanium Investment casting defects: a mettallographic overview."* JOM Vol. 58(6):pag. 13-16.

[32].John H. Mortimer; edford (**1990**), "Cold Crucible Induction Furnace", Pat., **Inductotherm Corp; Rancocas, N. J.**, USA.

[33].Livro - John M. Eridon (**1992**). "Hot isostatic pressing of castings". Ohio, ASM International, 15.

[34].Livro - john M. Powers (**1960**). "restorative Dental Materials". Missouri, Elsevier.

[35].Artigo - Kim (**2005**). *"Alpha-case formation machanism on titanium investment castings."* Materials, Science & Engineering A Vol. A(405):pag. 173-177.

[36].Artigo - Kim (**2007**). *"Melting and casting of titanium Alloys."* Materials Acience Forum Vol. 539-543:pag. 3601-3606.

[37].Artigo - Klug (**2004**). *"The Near-Net-Shape manufacturing of affordable titanium componentes for the M777 Lightweight Howitzer."* JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society Vol. 56 (11):pag. 35-41.

[38].Artigo - Koichi Sakamoto (**1992**). *"Changes in oxigen contents of titanium alumnides by vacuum induction, cold crucible and electron beam melting."* ISIJ International Vol. 32(5):pag. 616-624.

[39].Lamb (**1975**), "Metal casting", Pat. Nº:US 3,863,706, **Hitchiner Manufacturing Co, Inc**, USA.

[40].Livro - Leyens C. (**2003**). "Titanium and Titanium Alloys: fundamentals and applications", WILEY- VCH.

[41].Livro - Matthew J. Donachie (**2000**). "TITANIUM: a technical guide", ASM International.

[42].Livro - Mayer (**2001**). "Turbochargers - effective use of exhaust gas energy", BorgWarner Turbo Systems.

[43].narayan (**2004**), "Investment Casting of titanium using the induction skull melting process" Consarc company.

[44].Oles (**2004**), "Countergravity casting method and apparatus", Pat. Nº:US 6,684,934 B1, **Hitchiner**, USA.

[45].Philip G. Clites (**1939**), "Induction melting of metals in cold, self lined crucibles", Pat., **The United States of America as represented by the secretary of the Interior**, USA.

[46].Artigo - Poulsen (**2000**). *"Safety-related problems in the titanium industry in the last 50 years."* JOM Vol. 52(5):pag. 13-17.

[47].Artigo - R. G. Keanini (**2005**). *"Theorical model of the two-chamber pressure casting process."* Metallurgical and material transactions B Vol. 36B:pag. 283-292.

[48].Artigo - R. G. Keanini (**2007**). *"Theorical study of alpha case formation during titanium castings "* Metallurgical and material transactions B Vol. 38B:pag. 729-732.

[49].Sprague, *Gas turbine materials*, in *Advanced Materials & Processes*. 2004. p. 27 - 30.

[50].Livro - Stephan (**1982**). "Electron Beam Melting and Casting", ASM International, M. Handbook, 15.

[51].Sturgis (**1991**), "Refractory composition and method for metal casting", Pat., **Precision Castparts Corp. (Portland, OR)**, USA.

[52].Artigo - Suzuki (**1998**). *"The high-quality precision casting of titanium alloys."* JOM Vol. 50(9):pag. 20-23.

[53].Artigo - T. H. Schofield (**1953-54**). *"The melting point of Titanium."* Journal of Institute of Metals Vol. 82:pag. 167-169.

[54].Tama (**1933**), "Induction furnace for the heating of metals having a high melting point", Pat., **Ajax Electrothermic Corp**, USA.

[55].Tousignant (**1999**), "Melting of reactive metallic materials", Pat., **Hitchiner Manufacturing Co, Inc**.

[56].Livro - Vários (**1992**). "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM International, M. Handbook.

[57].Livro - Vasseur (**1992**). "Centrifugal casting", 15.

[58].Artigo - W.T.TAck (**2006**). *"Advances in investment casting of Ti6Al4V."* International Journal of cast Metals Research Vol. 19(2):pag. 73 - 93.

[59].Artigo - Ward (**2004**). *"Electrical and Magnetic Techniques for Monitoring Arc Behaviour During Vacuum ArcRemeltingof INCONEL 718."* Journal of Materials Science Vol. 39(24):pag. 7125-7143.

[60].Artigo - Watakabe (**2003**). *"Melting and precision casting of Ti-6Al-4V alloy by use of electron beam furnace."* Metals and Materials International Vol. 9(4):pag. 359.

[61].Artigo - Watkins (**1997**). *"Effect of pressure difference on the quality of titanium casting."* J Dent Res Vol. 76(3):pag. 773-779.

[62].Livro - Weingärtner (**1988**). "Vacuum arc skull melting and casting", ASM International, M. handbook, 15.

[63].Wood (**2003**). *"Recente titanium developments in USA"*. 10 th Wordl Conference on Titanium, Hamburg, Germany.

[64].Wukovich, *Melting Furnaces: Electric Arc Furnaces*, in *Casting*, A. International, Editor. 1992. p. 770 - 801.

[65].www.toho-titanium.co.jp. www.toho-titanium.co.jp.

[66].Y. Chen (**2003**). *"Economic-cost investment casting Technology of Titanium alloy"*. 10th World Conference on Titanium, Hamburg, Germany.

[67].Yamada (**1998**), "Method for casting metal and apparatus therefor", Pat. Nº:US 5,722,481, **Daido**, Japão.

[68].Yan (**2003**). *"The evolution of casting titanium in China"*. 10th World Conference on Titanium, Hamburg, Germany.

CAPÍTULO 5

DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DO EQUIPAMENTO

5– DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DO EQUIPAMENTO

Um processo de Desenvolvimento de Produto – PDP, pode ser compreendido como uma sequência de etapas ou actividades através das quais uma empresa concebe, desenvolve e comercializa um produto. Estas etapas vão desde a identificação das necessidades dos utilizadores até à aprovação final do produto tendo em vista a sua utilização. Um processo de Desenvolvimento do Produto bem definido é importante pelas seguintes razões [6]:

- Garantia de qualidade: verificando o cumprimento de cada etapa que foi previamente estruturada, o processo garante a qualidade do produto resultante dessa actividade;
- Coordenação: um processo bem definido mostra claramente o papel que cada colaborador desempenha e quais as interacções com cada um dos outros elementos da equipa de desenvolvimento;
- Planeamento: um processo de desenvolvimento contém vários marcos ao longo das várias etapas o que contribui para um planeamento concreto e um cumprimento dos prazos;
- Gestão: pela comparação do planeamento previamente efectuado com a situação concreta do desenvolvimento, é possível identificar problemas e analisar soluções;
- Melhoramento: o processo de desenvolvimento define a necessidade de boa documentação possibilitando futuros melhoramentos.

Para a actividade de desenvolvimento deste produto especifico, foi utilizada uma adaptação da metodologia apresentada por Ulrich e Eppinger da referência [6] e que abrange seis fases principais com as seguintes actividades:

- **Planeamento:** também designada a fase zero, por preceder a aprovação do projecto e o processo de desenvolvimento do produto propriamente dito. Esta etapa passa pela caracterização do mercado e por uma análise da viabilidade e competitividade do produto, identificação do tipo de produto e tecnologias necessárias, definição dos objectivos estratégicos e avaliação das necessidades da equipa de projecto. Desta etapa resulta a definição do objectivo do produto, principais limitações e/ou condicionamentos.
- **Desenvolvimento do conceito:** nesta fase é realizada um levantamento das necessidades do cliente, definição dos atributos e desenvolvimento e selecção dos conceitos até à especificação final do produto. Desta etapa resulta a definição dos atributos e especificações do produto e qual o princípio para a sua realização.
- **Desenvolvimento da arquitectura:** esta etapa envolve a definição da arquitectura do produto, decomposição em famílias ou módulos alternativos a essa arquitectura, abordagem ao ciclo de vida do produto, identificação dos produtos chave e das operações de montagem, previsão do contributo dos processos de fabrico. Como resultado desta fase obtém-se a geometria do produto, a especificação funcional de cada módulo e o modo como estes se integram no produto final.
- **Projecto de detalhe:** projecto técnico detalhado do produto, optimização do número de componentes e das operações de montagem; definição das operações, sequências de fabrico e tecnologias a aplicar. Desta fase resulta a elaboração do dossier técnico do produto contendo toda a informação que lhe diz respeito.
- **Testes:** esta etapa envolve a construção de um ou mais protótipos, realização de testes de desempenho; procedimentos de selecção, inspecção, medição e elaboração do relatório de resultados e avaliação do cumprimento dos requisitos. Como resultado desta etapa obtém-se informação acerca dos parâmetros de qualidade do produto.
- **Lançamento em produção:** o objectivo desta etapa é a preparação dos meios técnicos e humanos para o início da produção. Os primeiros produtos podem ser colocados em alguns clientes como forma de avaliar o seu desempenho e verificar a existência de alguma falha remanescente. Desta

etapa resulta a elaboração do dossier de fabrico, gestão da produção e preparação para projectos futuros.

Enquadrando este projecto na metodologia apresentada e no projecto COMTICAST em desenvolvimento pelo consórcio Zollern/ INEGI (referido no capítulo 1.3), tem-se como objectivo principal o projecto, desenvolvimento e execução de um forno de fusão e vazamento para ligas de titânio segundo as seguintes actividades:

- Elaborar, segundo as necessidades do consórcio, o conjunto de especificações técnicas, funcionais e de segurança e desenvolver o conceito;
- Definir o equipamento ao nível dos módulos básicos e subconjuntos envolvidos tendo por base as especificações técnicas;
- Projectar e definir todos os componentes a fabricar ou adquirir, executar desenhos de fabrico, documentação técnica para produção;
- Fabrico de todos os componentes, montagem do equipamento e realização de testes funcionais;

5.1 - ATRIBUTOS E ESPECIFICAÇÕES

A identificação dos atributos é fundamental para se obterem bons resultados no processo de desenvolvimento do produto. Tipicamente, esta tarefa obriga a uma recolha cuidada de informação junto do cliente, procurando criar uma lista de requisitos básicos que o produto deve cumprir. Este processo pretende garantir que o produto vá de encontro às necessidades do cliente e que nenhum atributo fundamental fica por cumprir. De seguida, é necessário interpretar essas necessidades de modo a organizar-se uma hierarquia de requisitos estabelecendo a importância relativa de cada um deles [6].

No projecto COMTICAST este processo foi estabelecido através da recolha das necessidades expressas pelos vários elementos do consórcio, no sentido de se obter uma tabela de especificações hierarquizada com indicadores de importância relativa entre elas. Os atributos resultantes deste processo servem como guia na definição das especificações técnicas e, consequentemente na geração de conceitos para a concepção do equipamento. Chegou-se assim ao conjunto de atributos do forno classificados por ordem crescente de importância entre 1 – a evitar e 5 – obrigatório e que são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Lista hierarquizada dos atributos do forno de fusão e vazamento

Nº	ATRIBUTOS	IMPORTÂNCIA
1	O equipamento permite fundir ligas de Titânio	5
2	O equipamento permite fundir ligas reactivas	5
3	O forno é baseado na tecnologia da indução	5
4	O equipamento deverá fundir 3Kg de Ti em 3minutos	5
5	A moldação deve arrefecer no interior do forno até uma temperatura inferior à temperatura de formação de *“α-case”*	5
6	O vazamento do metal líquido deve ser realizado com recurso a pressões diferenciais	5
7	Obtenção mínima de 1 impulsor de Ø 65	5
8	Obtenção máxima de 6 impulsor de Ø 99	5
9	A segurança dos utilizadores deve ser salvaguardada durante o processo de fusão	5
10	O processo total de fusão e vazamento deve ser o mínimo possível (3Kg em 5 minutos)	5
11	Deve ser possível visualizar a fusão	5
12	As pressões diferenciais devem permitir encher peças de paredes finas (pelo menos 0,3mm)	5
13	A preparação do forno em cada fusão deve ser rápida e fácil	5
14	Deve haver a possibilidade de medir a temperatura do metal líquido no interior do forno	5
15	A pressão no interior do forno deve poder ser monootorizada durante a fusão	5
16	Leitura e aquisição de dados durante a operação do forno (valores de vácuo, temperaturas, potência, frequência, pressão de árgon)	4
17	O processo de fusão deve requerer o mínimo de recursos humanos possíveis	4
18	Controlo e operação automática do forno	4

19	O forno deve estar preparado para a adaptação de cadinhos frios no futuro	4
20	O forno deve estar preparado para futura produção em série	3

A lista de atributos apresenta uma alteração em relação às necessidades iniciais do consórcio. O atributo alterado refere-se à quantidade de Titânio a fundir, atributo nº 4 e o número mínimo e máximo de peças a obter, atributos nº 7 e 8. Esta alteração deveu-se à alteração no orçamento disponível para o projecto, nomeadamente para a aquisição de equipamentos.

Estes atributos são tipicamente expressos em linguagem corrente, aparecendo como necessidades algo subjectivas que consequentemente deixam margens de interpretação consideráveis. Por esta razão, a metodologia de desenvolvimento seguida aponta para a necessidade de estabelecer uma lista de especificações que expresse concretamente e de um modo mensurável, quais os requisitos que o produto tem que cumprir, ou seja as especificações alvo do projecto.

Idealmente, as especificações devem ser encontradas no início do processo de desenvolvimento do produto, antes de se iniciar o desenvolvimento do conceito e o projecto de detalhe. No entanto, e por razões que se prendem com o carácter iterativo deste processo ou com o nível tecnológico do produto a desenvolver, isso raramente é realizável. Como neste ponto inicial ainda não são conhecidas todas as implicações dessas especificações, bem como as limitações tecnológicas que daí advenham, há que ter em conta que ao longo do decorrer do processo de desenvolvimento do produto essas especificações podem ter que ser revistas e alteradas, resultado do aparecimento de incompatibilidades técnicas inerentes à tecnologia a aplicar ou desenvolver, ou de outras restrições como custos de produção ou da tecnologia em causa [6]. As últimas especificações resultantes desta actividade de desenvolvimento iterativa chamam-se comummente especificações finais. Neste projecto a definição das especificações finais passou por 4 fases:

- Estabelecimento das especificações alvo;
- Geração conceitos do produto;
- Selecção do conceito do produto;
- Estabelecimento das especificações finais.

A especificidade do produto em causa, e o facto deste ser apenas para uso interno e uma primeira versão do que se espera vir a ser mais tarde um equipamento de um processo industrial, as fases do seu desenvolvimento não tiveram na prática uma separação tão evidente como é apresentada, isto também é devido ao já referido carácter iterativo que caracterizou este processo.

A definição das especificações alvo passou por 3 etapas:

- Elaboração de uma lista de métricas;
- Estabelecimento de um valor e de uma margem aceitável para cada uma dessas métricas;
- Análise e interpretação do resultado.

As métricas mais úteis ao processo de desenvolvimento do produto são aquelas que reflectem directamente a satisfação de um atributo, ou seja, as que resultam da tradução directa de um atributo numa ou várias especificações mensuráveis. Idealmente cada atributo deveria originar uma e só uma métrica, sendo que raramente isso é possível [6]. Na tabela 5.2 apresentam-se as métricas geradas a partir dos atributos, o mesmo será dizer as especificações alvo.

A atribuição de valores na lista de especificações alvo apresentadas derivou de três fontes:

- O estudo do estado da arte actual;
- Testes anteriormente realizados no âmbito do projecto COMTICAST;
- Definição interna pelos elementos do projecto.

Tabela 5.2 – Lista de métricas geradas a partir da lista de atributos

Nº Métrica	Atributos	Métrica	Imp.	Unid.	Valores
1	4;7;8	Massa de metal a fundir	4	kg	0.2 - 5
2	1;2	Atmosfera inerte	5	ppm	Menor possível
3	4	Tempo de fusão de metal	5	seg	Menor possível
4	4;5;10	Tempo total de fusão e vazamento	5	seg	180 - 600
5	7; 8;12	Peças de paredes finas	5	mm	<0.9
6	1;2;3;4;19	Potência para fundir massa de metal desejada	5	KW	25 - 200

7	1;2;6;15	Controlo das pressões no interior do forno	5	Pa	0.01 – 2x105
8	6; 12	Pressões diferenciais	5	Pa	<5x10^{4}
9	13	Facilidade na preparação do forno para fusão	3	seg	<60
10	14	Controlo da temperatura de fusão	3	K	1941 + 473
11	5	Controlo da temperatura da moldação	5	K	773 – 1773
12	16;18	Automatização das operações do forno	3	V	24 -240
13	20	Produção em série	2	nº peças/dia	40 - 850
14	17	Operação do forno por pessoal	3	nº pessoas	1 – 2
15	9	Segurança na operação de fusão e vazamento	5	Lista	Lista tarefas

As especificações 1; 9; 12; 13;14;15; derivam das necessidades do consórcio, as restantes surgiram do estudo da arte isoladamente ou reforçadas com testes, a saber: 4; 6; 7; 8 e 11. Às especificações nº 2 e 3 foi atribuído o valor “menor possível” por serem especificações onde o valor ideal vai estar limitado pela tecnologia, ou pelas propriedades dos elementos em causa.

Uma vez finalizada a lista de especificações alvo é necessário iniciar o estudo e desenvolvimento de soluções que permitam o cumprimento dessas mesmas especificações. É também necessária a realização de uma avaliação dos custos de desenvolvimento e de produção de um equipamento que cumpra a lista de especificações alvo geradas. Estas especificações representam as aspirações da equipa de desenvolvimento.

A decisão interna dos elementos do projecto COMTICAST, relativamente à capacidade de fusão, foi baseada na quantidade anual necessária, avançada por um cliente da ZCP. Assim foram estabelecidas as seguintes quantidades:

- MÍNIMA – 1 Impulsor de Ø 65mm = 0,2kg (com o sistema de gitagem incluído);
- Máxima – 6 impulsores de Ø 99mm = 5kg (com sistema de gitagem incluída).

Figura 5.1 - Moldações com a capacidade máxima e mínima do forno: 1 impulsor de Ø 65mm; 4 impulsores de Ø 99mm. O cacho de 6 impulsores segue a filosofia do cacho de 4.

5.2 – Desenvolvimento do Conceito

Um conceito de um produto é uma descrição aproximada dos seus princípios de funcionamento, forma, função, tecnologia utilizada e aspecto geral, ou seja, uma descrição da forma como poderão ser alcançadas as especificações alvo. Na metodologia seguida esta abordagem deve processa-se em cinco etapas:

- Clarificação do problema;
- Pesquisa externa;
- Pesquisa interna;
- Exploração das alternativas;
- Reflexão sobre os resultados.

A clarificação do problema consiste na análise global do sistema e a sua decomposição em vários subconjuntos a analisar em separado. Tipicamente o objectivo do desenvolvimento de produtos é demasiado complexo para ser abordado de forma integral, assim a decomposição do problema principal em problemas específicos, torna o processo mais simples e eficaz. A primeira etapa deste processo deve ser a representação do funcionamento geral do conjunto de uma forma simplificada, figura 5.2 e Anexo B.

Figura 5.2 – Diagrama geral do principio de funcionamento do forno de fusão/vazamento.

O passo seguinte, é decompor o conjunto principal em subconjuntos de modo a criar uma descrição mais pormenorizada do que cada um dos subconjuntos deve fazer. No que diz respeito ao desenvolvimento do forno de fusão/vazamento foram considerados os seguintes subconjuntos:

- Sistema de indução para fusão do metal;
- Sistema de vácuo;
- Corpo do forno;
- Refrigeração da estrutura metálica;
- Sistemas de accionamento;
- Sistemas de segurança;
- Arrefecimento do fundido.

A figura 5.3 e o anexo B mostram o diagrama de funcionamento considerando os subconjuntos do forno de fusão/vazamento.

Numa segunda etapa devem realizar-se pesquisas sobre soluções para problemas similares já existentes no mercado, uma vez que, como facilmente se compreende, é claramente mais simples e barato implementar uma solução já existente do que desenvolver uma de raiz. Por outro lado, o recurso a soluções existentes no mercado liberta recursos e esforços para a resolução de outros problemas que possam não ter uma solução tão imediata. Este tipo de pesquisa a elementos externos pode ainda ser conduzida através da pesquisa de patentes e consulta de literatura existente ou até incluir a consulta de especialistas nas áreas envolvidas.

O outro tipo de pesquisa de soluções utilizado pode ser realizado a nível interno, dentro da estrutura organizacional na qual se processa o desenvolvimento do produto. De facto, o recurso ao pessoal e ao conhecimento interno, conduz ao surgimento de inúmeras ideias para a resolução dos problemas, uma vez que o

sucesso do processo depende muitas vezes, da capacidade de avaliar rapidamente um conjunto de soluções alternativas e implementar a que melhor se adequa [6].

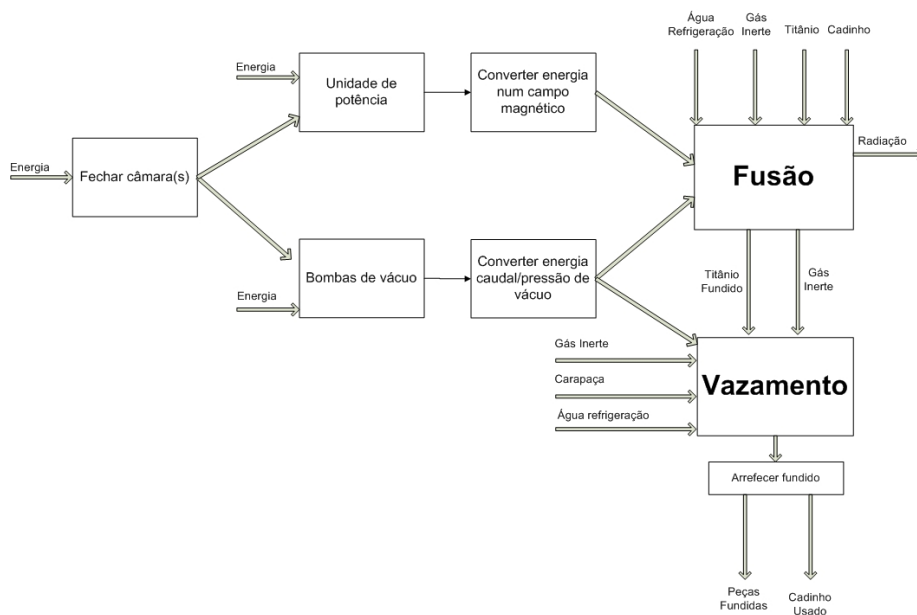



Figura 5.3 - Diagrama detalhado do principio de funcionamento do forno de fusão/vazamento e dos seus subconjuntos.

Como resultado destas pesquisas obtêm-se inúmeras ideias para soluções de partes do problema global. É necessário estruturar e agrupar essas pequenas ideias e analisar qual o contributo de cada uma delas para a solução final.

Assim, com base na pesquisa e na experiência existente e adquirida em testes realizados antes do início deste projecto, foram encontradas soluções para alguns dos subconjuntos do princípio geral de funcionamento.

5.2.1 – SISTEMA DE POTÊNCIA PARA A FUSÃO DE MASSA DE TI

Os sistemas de aquecimento por indução consistem basicamente numa fonte de corrente alternada (AC), uma bobine indutora e um corpo condutor a ser aquecido. O conceito básico desta tecnologia pode ser melhor compreendido tendo em conta: a relação entre a bobine e a peça, e na fonte de potência a potência (corrente e tensão), a frequência e a geometria da bobine. Através destes elementos é possível deduzir quais os efeitos eléctricos e térmicos que são induzidos no corpo através da bobine [24].

O aquecimento por indução coloca em jogo três princípios físicos sucessivos:

- Transferência de energia da bobine aos corpos a aquecer por meio electromagnético (Lei de Lenz);

- o Transformação em calor, nos corpos, da energia eléctrica transferido por efeito Joule;
- o Transmissão do calor nos corpos, por condução térmica.

Nestes sistemas a bobine indutora e o corpo funcionam como o primário e o secundário, respectivamente, de um transformador eléctrico. Quando a bobine é atravessada por uma corrente AC, fornecida pela fonte de potência, esta corrente gera um campo magnético que rodeia cada espira da bobine e toda a bobine figura 5.4. O campo magnético que rodeia a bobine, induz uma corrente eléctrica de igual intensidade e sentido oposto no corpo a aquecer, que se traduz segundo a lei de Faraday:

$$E = -N \frac{\Delta \phi_\beta}{\Delta T} \tag{5.1}$$

com:

N – nº de espiras da bobine;

$\frac{\Delta \phi_\beta}{\Delta T}$ - razão da variação da força electromagnética.

Devido às propriedades físicas do corpo (que no caso da fusão é um metal, como se vai passar a designar a partir de agora), nomeadamente a resistência eléctrica, a corrente de Eddy induzida provoca uma queda de tensão descrita pela lei de Ohm: $V = R$I (5.2), onde V é a tensão, R a resistência eléctrica e I a corrente induzida pela bobine. A esta queda de tensão estão associadas perdas por efeito de Joule que resultam no aquecimento do metal segundo a seguinte expressão: *Perdas* = I^2R (5.3), onde I é a corrente e R a resistência eléctrica do metal [16, 24].

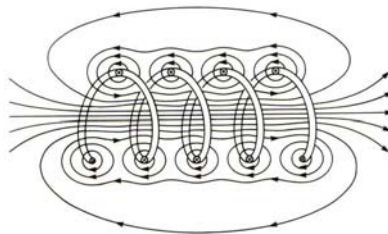



Figura 5.4 – Ilustração esquemática do campo magnético induzido associado a uma bobine onde circula uma corrente AC. Na bobine o ponto significa corrente na direcção do leitor e o x na direcção da folha [24].

O campo magnético induzido é mais forte no espaço compreendido entre o diâmetro interior da bobine e o diâmetro exterior do metal (considerando este como um cilindro). Assim, as correntes de Eddy induzidas no metal são mais fortes na periferia deste, e diminuiem continuamente em direcção do centro. Este fenómeno de maior

intensidade das correntes na superfície das peças é conhecido como efeito de pele, figura 5.5. A profundidade do efeito de pele, ou como é conhecida a profundidade de penetração, depende da frequência do campo eléctrico, da resistividade eléctrica e da permeabilidade magnética da peça metálica, e é traduzido pela seguinte equação [1, 16, 24]:

$$p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi . F . \mu o . \mu m}} \tag{5.4}$$

com:

p – profundidade de penetração do efeito de pele;

ρ – Resistividade do material (resistência eléctrica);

μo – constante de permeabilidade magnética = $4\pi \times 10^{7}$ Wb/A.m;

μm – permeabilidade magnética do material;

F – frequência.

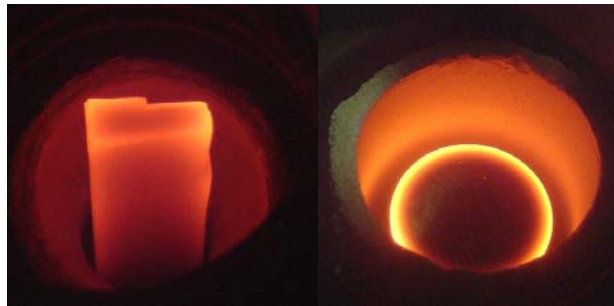



Figura 5.5 – Efeito pele em duas geometrias diferentes de Titânio, obtidas com um forno de radiofrequência INEGI.

Para melhor compreensão deste efeito, ele é definido como a profundidade a que 86% do calor, é gerado devido à resistência à corrente eléctrica induzida. Este efeito varia com a temperatura do metal, uma vez que a resistividade deste também varia. O conceito de profundidade de penetração, permite definir mais duas importantes características destes sistemas: a resistência equivalente (*Re*) e a eficiência eléctrica (*ηe*). A resistência equivalente é a resistência do corpo quando colocado em série com a bobine, e que dissipa calor segundo a expressão (5.3), (*Perdas* $=I^2Re$). Facilmente se percebe, que para que a indução das correntes de Eddy se faça de uma forma homogénea entre a bobine e a peça, a forma da primeira deve estar adaptada à da segunda. Para uma barra de metal cilíndrica uma bobine redonda é a geometria com melhor eficiência, e neste caso a resistência traduz-se por:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho . \pi . d . Kr . N^2}{p . l} \tag{5.5}$$

com:

Re – resistência equivalente

ρ – resistividade do material (resistência eléctrica);

d – diâmetro exterior da peça metálica;

Kr – constante de transferência de potência em função da relação d/p (figura 5.6);

p – profundidade de penetração do efeito de pele;

l – comprimento da bobine;

N – nº de espiras.

A dependência da *Re* do número de espiras (*N*), deve-se ao facto de tanto a tensão induzida como as correntes de Eddy, aumentarem linearmente com o número de espiras de acordo com a lei de Faraday (5.1), e a lei de Ohm (5.2).

O valor de *Kr* é função do diâmetro da barra sobre a profundidade de penetração: d/p. Pelo gráfico da figura 5.6 pode ser visto que o aumento da relação *d/p* provoca um aumento de *Kr*, e consequentemente de *Re*. Um aumento de *Kr* requer um aumento de p, que pode ser conseguido com frequências mais altas, como pode ser verificado na equação 5.4. Isto tem um significado muito importante em alguns tipos de equipamento, uma vez que o custo das unidade de potência aumentam com o aumento da frequência.

O gráfico da figura 5.6 também permite definir o conceito de frequência óptima de operação. Esta é a frequência, abaixo da qual a eficiência eléctrica cai drasticamente. Este fenómeno acontece quando a profundidade de penetração (*p*) é tal, que as correntes de Eddy induzidas em cada lado do corpo chocam, e se anulam, por serem de sinais contrários[1, 16].

O conhecimento da resistência equivalente *Re* e da resistência da própria bobine de indução, permite saber qual é a eficiência eléctrica do sistema.

$$\eta = \frac{\mathrm{Re}}{Rb + \mathrm{Re}} \tag{5.6}$$

com:

η – rendimento eléctrico;

Rb - resistência da bobine

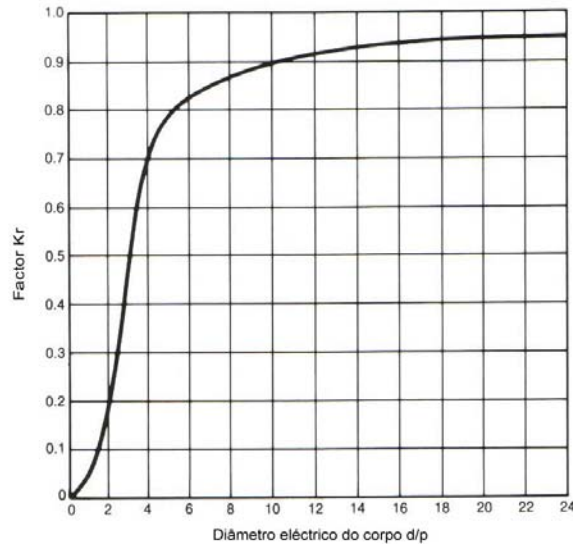



Figura 5.6 – Factor de correcção usado para o cálculo da resistência equivalente do corpo [24].

Facilmente se percebe por esta equação qual é a razão do uso de bobines de cobre. Como este é o metal com menor resistividade dos materiais mais comuns, menor é *Rb* e logo maior é a eficiência eléctrica. A equação 5.6 traduz uma situação ideal onde as perdas são apenas para a bobine e para a peça, porém nos fornos de indução o campo magnético pode atingir outros elementos, como por exemplo a estrutura, que vai criar uma certa resistência, ou seja perdas por indução, diminuindo a concentração no metal. Assim eficiência eléctrica será dada de acordo com a equação seguinte:

$$\eta = \frac{\mathrm{Re}}{Rb + \mathrm{Re} + Rs} \tag{5.7}$$

com: *Rs* - resistência de todo o sistema.

A especificação da frequência, assume assim um papel importante na definição deste tipo de sistemas, as altas-frequências apresentarem maiores rendimentos, enquanto as baixas frequências, por outro lado, são responsáveis por maior penetração das correntes de Eddy nos corpos, conseguindo assim tempos de fusão mais rápidos, principalmente para corpos mais volumosos, e são especialmente importantes quando se pretende agitação dos banhos, figura 5.7 [15].

As características da fonte de potência utilizada também definem as características da frequência. De um modo geral, os processos tradicionais de fusão de metais por indução utilizam a média frequência. A radiofrequência também é utilizada mas em menor escala.

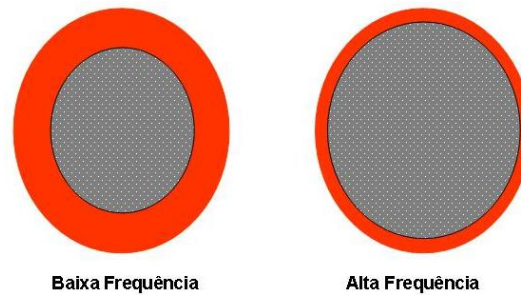



Figura 5.7 – Penetração das correntes de Eddy em função da intensidade da frequência [15].

A frequência da radiação electromagnética pode ir desde DC até à luz do dia, porém, só uma pequena parte desta gama tem interesse para os processos de fundição, figura 5.8, principalmente entre a média frequência e a radiofrequência

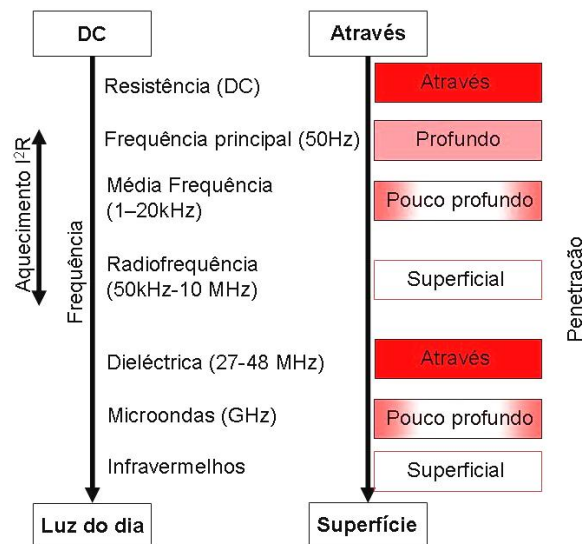



Figura 5.8 – Gama de frequências [18].

De um modo geral as fontes de potência normalmente utilizadas na fundição são constituídas por figura 5.9:

- Gerador;
- Condensadores;
- Bobine indutora.

O ajuste do aquecimento por indução requer a afinação da capacitância e da indutância do circuito ressonante, que é constituído por condensadores, bobine e o corpo a aquecer, de modo a que a frequência deste circuito (frequência ressonante), seja igual ou próxima à frequência da fonte de potência.

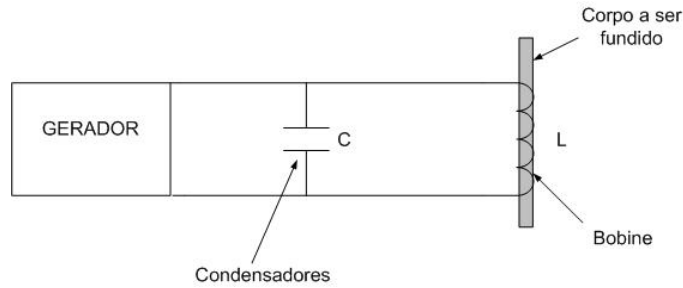



Figura 5.9 – Esquema básico de uma fonte de indução.

A frequência ressonante, que vai determinar a profundidade de penetração (p), pode ser ajustada pelo valor capacitivo dos condensadores e pela indutância da bobine, figura 5.10, segundo a seguinte equação:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (5.8)$$

com:

F – frequência (Hz);

L – indutância da bobine (H - henry) – capacidade de armazenar energia sob a forma electromagnética;

C – Capacitância dos condensadores (micro faraday) – a capacidade de armazenarem energia sob a forma electrostática.

A capacitância dos condensadores é determinada pelo valor destes e o modo como estão dispostos entre eles, em série ou paralelo. Já no que diz respeito à indutância, esta varia directamente com as características físicas da bobine através da equação:

$$L = \frac{1\times10^{-7}\pi^2 D^2 N^2}{H} \times \frac{1}{1 + 0.44 \times \frac{D}{H}} \qquad (5.9)$$

com

L – indutância na bobine;

D – diâmetro da bobine;

N – número de espiras da bobine;

H – altura da bobine.

Assim, a definição das características físicas da bobine assume um papel importante na especificação da frequência do sistema indutivo e da potência transmitida à peça para o seu aquecimento, equação 5.10.

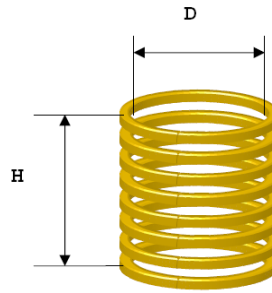



Figura 5.10 – Bobine multiespiras.

Porém, a geometria da bobine é determinada pela geometria do corpo a aquecer. Para se obter a máxima eficiência neste conjunto, deve ser usada uma bobine que se adapte o mais possível à geometria do corpo a aquecer, para permitir a máxima eficiência (este assunto será abordado novamente mais à frente no texto) [8, 16].

$$Pp = \rho \frac{N^2 I^2}{pH} Kr.S \tag{5.10}$$

Com:

Pp – potência transmitida à peça;

ρ- resistividade do material;

Kr – constante de transferência de potência em função da relação d/p;

S – superfície da peça;

N – número de espiras;

I – corrente na bobine;

H – comprimento da bobine.

Pelas equações 5.9 e 5.10, podemos ver a influência das características da bobine no aquecimento das peças, e como a sua correcta definição desempenha uma factor importante na performance destes sistemas.

Por outro lado, o circuito ressonante no seu todo (condensadores, bobine e carga), é visto pela fonte de potência como uma resistência, que se opõe à passagem da corrente. Esta oposição vai influenciar a tensão e corrente que a fonte de potência fornece para o aquecimento de determinada corpo. Por outro lado, a fonte de potência tem limites de corrente e tensão que não podem ser excedidos por comprometerem a eficiência do aquecimento. Assim, a razão entre a tensão e a potência da fonte de potência definem a sua impedância, equação 5.11. Este é um conceito muito importante no aquecimento por indução, e permite saber a zona mais eficiente de operação (corrente e tensão máxima), para a unidade de potência e que se traduz num gráfico tipo o da figura 5.11 [1, 15, 16].

$$Z = \frac{T}{P} \tag{5.11}$$

Com:

Z – impedância;

T – tensão na fonte de potência;

P – potência na fonte de potência.

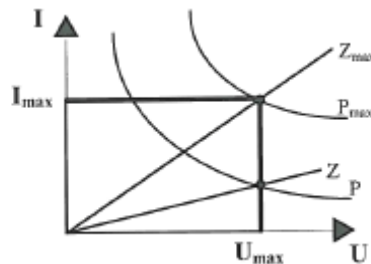



Figura 5.11 – Gráfico tipo de Impedância para uma unidade de potência.

A impedância depende das características do corpo a aquecer, das características dos condensadores e da bobine, e pode ser ajustada através de [8]:

- O ajuste do espaço entre a bobine e o corpo – quanto maior for este intervalo, maior será a impedância do corpo visto através da fonte de potência. A influência deste ajuste na frequência é pouco significativo, por outro lado a sua correcção obriga à construção ou ajuste da bobine;

- O ajuste da unidade de condensadores – o ajuste do número de condensadores, a forma como estão ligados ou o seu valor é outra das formas de ajustar a impedância. Quanto maior for o valor da capacitância, menor será a impedância.

Com o conceito de impedância, surge um outro conceito, o factor de qualidade Q. Este factor assume também um papel importante na definição do sistema de aquecimento por indução. Este factor representa a razão entre a reactância indutiva (a oposição da bobine vista pela fonte de potência), e a resistência total do circuito. O factor Q, também oferece uma comparação entre a energia total num circuito e a energia dissipada no circuito ressonante. Os valores de Q situam-se entre os 20 e os 100, porém, segundo os fabricantes destes sistemas, para um mesmo sistema o valor correcto de Q para diferentes situações, é melhor determinado pela experimentação. O valor de Q assume a seguinte fórmula [16]:

$$Q = \frac{Preactiva}{Pactiva} = \frac{U^2 C.F}{Plida} \qquad (5.12)$$

Com:

Q – factor de qualidade;

Preactiva – potência do circuito ressonante;

Pactiva – potência do circuito normal, que é lida na unidade de potência;

U – tensão no circuito ressonante;

F – frequência;

C – capacitância.

A escolha dos requisitos de potência e frequência dos sistemas de aquecimento por indução, são muito dependentes da aplicação específica a que se destinam e dependem da relação quantidade de metal a fundir por unidade de tempo. Assim o conhecimento das características dos vários sistemas disponíveis desempenha um ponto importante.

Dentro da gama de frequências utilizadas para o aquecimento por indução, os sistemas de frequência principais (até 50Hz) e os de média frequência (1-20KHz), mostrados na figura 5.7, utilizam um circuito eléctrico equivalente ao apresentado anteriormente (figura 5.9). Estes sistemas utilizam inversores THYRISTOR, para potências mais baixas (50kW), ou IGBT - (Insulated Gate Bipolar Transistor) para potências acima de (500kW), respectivamente, como meio de fornecimento da energia necessária para o aquecimento. Os sistemas de radiofrequência (50KHz-10MHz) eram inicialmente osciladores a válvulas (Vacuum tube valve), caracterizados pela elevada tensão na bobine e elevadas correntes DC no oscilador, que apesar disso tinham rendimentos de apenas 60%. Desde a década de 80, esta tecnologia tem vindo a ser substituída pelos inversores MOSFET - (acrónimo de Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor), que conseguem actualmente potências de 1MW a 800 KHz. Uma comparação entre as gamas de funcionamento dos diferentes sistemas pode ser visto na figura 5.12 [18].

As características geométricas da bobine e a sua relação com a carga a aquecer, como já foi dito, desempenha um papel importante na definição da frequência de operação e na eficiência geral destes sistemas.

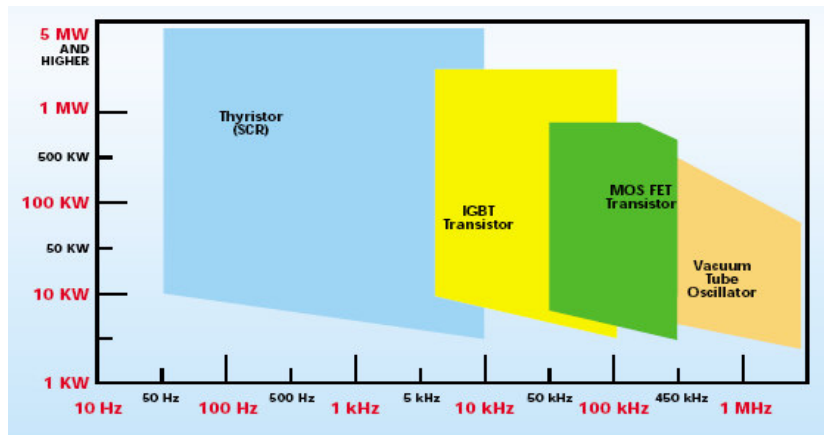



Figura 5.12 – Gama de aplicação dos diferentes sistemas de indução [23].

Para além das características já referidas no cálculo da indutância, a saber: altura, diâmetro e número de espiras, outros factores importantes são:

- Uniformização do aquecimento;
- Travamento das bobines;
- Perda de potência indutiva.

A uniformização do aquecimento da carga é um factor importante na eficiência do aquecimento. Esta pode ser conseguida através de algumas técnicas tais como:

- O posicionamento da carga na bobine;
- A selecção do tubo da bobine;
- A geometria da bobine.

Uma distribuição correcta do campo magnético por toda a peça providência um aquecimento mais uniforme e logo uma fusão mais rápida. O posicionamento da carga na bobine influência o modo como a primeira é atingida pelo campo magnético da segunda, e assim gera mais ou menos corrente e consequentemente aquece mais ou menos. É desejável que a carga seja intersectada pelo maior número de linhas de fluxo possível. Quanto mais denso for o fluxo mais elevada será a corrente gerada na carga.

Uma vez que o fluxo é mais concentrado junto às espiras da bobine e decresce na direcção do interior da bobine, se uma carga for colocada descentrada no interior da bobine, a área junto às espiras da bobine será intersectada por maior numero de linhas de fluxo e assim aquecerá mais. O resultado pode ser visto na figura 5.13, este efeito é mais pronunciado na alta frequência [16].

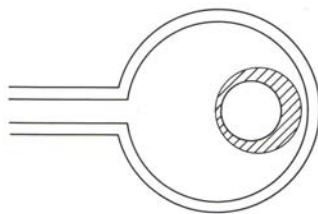



Figura 5.13 – Aquecimento produzido numa barra circular colocada descentrada numa bobine de indução [16].

Assim, a bobine deve ser concebida de modo a ser tão justa quanto possível à carga para permitir a maior eficiência no aquecimento.

Como a corrente circula na periferia da bobine, a transferência desta corrente para a carga é maior quanto maior for a área da bobine exposta à peça. Assim um outro aspecto a ter em conta é a geometria do tubo utilizado na construção da bobine. Como pode ser visto pela figura 5.14, um tubo de secção circular compromete a eficiência do aquecimento por reduzir a área condutora das linhas de fluxo.

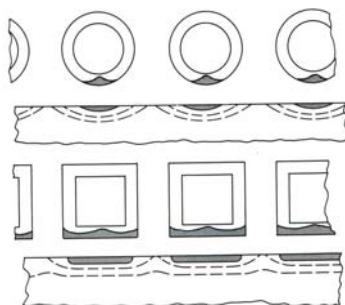



Figura 5.14 – Comparação do padrão de aquecimento produzido por diferentes geometrias de secções de tubo da bobine [16].

Outra técnica importante para promover a homogeneização do aquecimento, prende-se com o aproveitamento da primeira e da última espira. Estas espiras por estarem ligadas à alimentação de corrente e água à bobine, não acompanham a sua geometria normal, e como tal o seu desempenho é prejudicado, como se pode ver na zona assinalada na figura 5.15. Porém, existem algumas técnicas para compensar a perda nestas espiras, tais como: a introdução de um passo na bobine, figura 5.15, ou a compensação da zona onde não existe espira através de uma chapa em cobre, figura 5.16 [16, 18, 25].

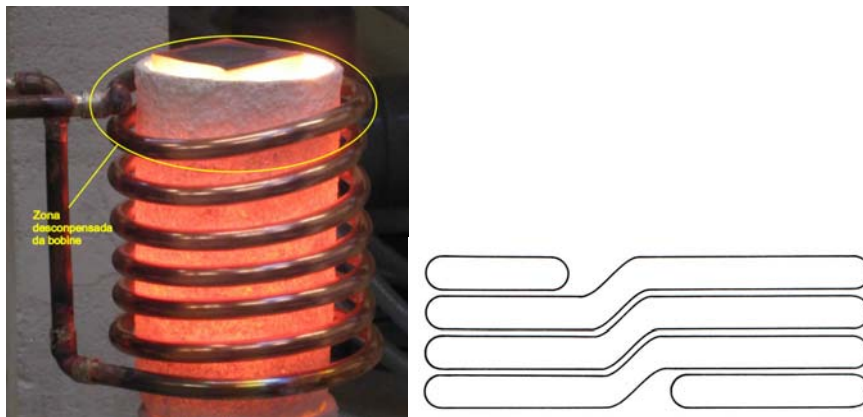



Figura 5.15 – Concentração de potência no centro da bobine. É evidente a perda de eficácia da primeira e da última espira. Bobine com um passo para promover a uniformidade no aquecimento [16]

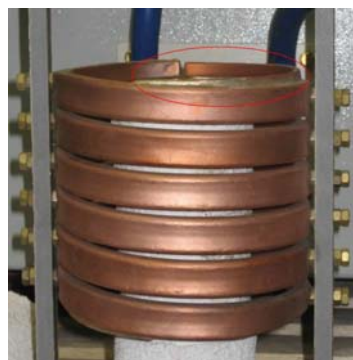



Figura 5.16 – Chapa em cobre para compensar a perda de indução na primeira e na última bobine.

Ainda no que diz respeito à construção de bobines, outro aspecto a ter em conta é o espaçamento entre espiras. A distância entre duas espiras consecutivas deve ser a menor possível de modo a criar o menor espaço possível sem condução de corrente na peça. No mesmo sentido, este procedimento pode permitir para uma mesma altura (H) de bobine, introduzir maior numero de espiras, aumentando assim a potência transmitida para a peça. Porém, em determinadas características de corrente eléctrica na bobine pode ocorrer arco eléctrico entre duas espiras consecutivas. Este fenómeno ocorre principalmente quando estão presentes na bobine tensões muito elevadas.

Outro fenómeno que pode estar presente nas bobines, mediante certas frequências, é a vibração das espiras, que obriga a travá-las de modo a evitar que entrem em contacto entre elas. Este fenómeno deve-se às forças magnéticas desenvolvidas entre a peça e a bobine, que dependem da magnitude da corrente que a atravessa. Quando suficientemente fortes, estas forças podem provocar a levitação do metal na bobine, mas se a carga tiver uma massa elevada, a bobine terá tendência para se mover em relação à carga, e as próprias espiras moverem-se. Algumas das técnicas usadas no travamento das bobines são: a brazagem de parafusos em cada espira

que depois são fixos a uma barra isolante para manter as espiras na posição correcta, ou o uso de um cimento que envolve todas as espiras, figura 5.17, [16].

Figura 5.17 – Técnicas usadas para o travamento de bobinas.

Estes fenómenos, típicos nos fornos de baixas frequências para fusão de metal são também os responsáveis pelo barulho típico durante a sua operação. Porém, podem também ocorrer em situações onde frequências mais elevadas são usadas, principalmente se estiverem envolvidas massas de metal muito elevadas.

Outro aspecto importante a ter em conta neste capítulo, é a perda de potência indutiva para outros elementos, em vez da carga. A alimentação da unidade de potência à bobine, é um ponto que pode ser critico caso não seja bem executado, figura 5.18. neste caso, o campo deve ser eliminado para não haver perda de potência indutiva antes da bobine [16, 18].

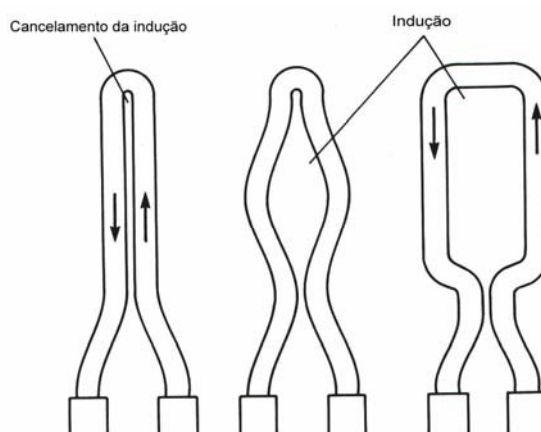



Figura 5.18 - Efeito da geometria das bobines na indução [16].

Outro aspecto importante é a perda de potência para outros elementos que constituem o forno, e que por algum motivo estão ao alcance do campo magnético. A perda de potência para outros elementos vai influenciar fortemente o desempenho pretendido, por não concentrar toda a potência disponível na carga que se pretende

aquecer. Estas perdas podem ser para a estrutura metálica que constitui o forno, o cobre da bobine e a própria água que circula na bobine. Esta informação é fornecida por todos os fornecedores de equipamentos de indução, e depende do tipo de frequência (alta, média ou baixa).

Todo o conhecimento adquirido na bibliografia, aliado à experiência adquirida com a realização de um conjunto de testes de fusão em diferentes fornos, conduziram à definição da melhor solução para a unidade potência a adquirir. A maioria destes testes foi realizada antes do início deste projecto, e tiverem um papel preponderante na tomada de decisão. Foram realizados em várias unidades de potência com diferentes características, a saber:

- Unidade de potência *“Vacuum Tube Valve”* (INEGI): Potência 10 kW; Frequência 1.3 MHz;
- Unidade de potência de radiofrequência com cadinhos frios (IFIMUP - UP): Potência 50 kW; Frequência 100 kHz;
- Unidade de potência Indução (Zollern Gmbh): Potência 200 kW; Frequência 4KHz;
- Unidade de potência Mosfet (Celes - França): Potência 50 kW; Frequência 10 – 100 kHz;
- Unidade de potência Mosfet (Celes - França): Potência 100 kW; Frequência 10 – 50 kHz;
- Unidade de potência Mosfet (Ameritherm – França): Potência 45 kW; Frequência 10 – 400 kHz.

A primeira unidade é um forno CALAMARI de radiofrequência tipo *“Vacuum Tube Valve”* dos anos 80, pertencente ao INEGI, e onde foram realizados a grande maioria dos testes. Esta unidade de potência para além do sistema eléctrico, contava apenas com algumas bobines de indução que eram montadas directamente na unidade de potência. Foi-lhe entretanto adaptada a uma câmara de vácuo de um antigo forno de indução BALZERS. Este trabalho de adaptação e os testes realizados à posteriori, permitiram adquirir familiaridade em vários temas, nomeadamente: a tecnologia da indução, a tecnologia de vácuo e construção de bobines.

A realização desta adaptação foi vista inicialmente no projecto COMTICAST, como solução interna para uma unidade de fusão e vazamento de titânio, que permitisse a realização de testes nas moldações cerâmicas desenvolvidas internamente e aferir a sua validade em termos de "α-case". Como foi referido no ponto 5.1, tabela 5.2, estava previsto inicialmente fundir apenas a quantidade de Ti necessária à obtenção de uma peça de 65 mm de diâmetro, cerca de 200 g. Este limite era imposto pela unidade de potência em questão e seria apenas durante a primeira fase do projecto COMTICAST. Os primeiros orçamentos pedidos, já no decorrer deste trabalho, foram ainda para estas quantidades de Ti, sendo mais tarde alterados com o aumento da verba financeira do projecto.

Ao nível da tecnologia da indução, os primeiros trabalhos permitiram a aquisição de conhecimentos acerca de materiais isolantes e das suas resistividades eléctricas, nomeadamente o seu uso na passagem da bobine para o interior da câmara de vácuo. Adquiriu-se também conhecimento sobre a condução de corrente entre a unidade de potência e a bobine, particularmente no que diz respeito a perdas indutivas antes da bobine e perdas para elementos adjacentes, p.e. a câmara de vácuo. Nas figuras 5.19, pode ser vista a unidade de potência e a adaptação da câmara de vácuo.

Figura 5.19 – Unidade de potência de radiofrequência tipo *"Vacuum Tube Valve".* Câmara de vácuo Balzers adaptada à unidade de potência CALAMARI

Ao nível dos conhecimentos de indução, os resultados mais importantes, foram ao nível da adaptação das características deste forno à aplicação em causa. A realização de fusões em vácuo, com barras de 30 mm diâmetro por 55 mm de comprimento (cerca de 180 g) de Ti, e usando cadinhos cerâmicos, permitiu chegar à conclusão que as características desta unidade não permitia utilizá-la como forno

para fusão em vácuo ou atmosfera controlada. Esta quantidade de Ti era fundida ao ar em 60 segundos.

Foi estabelecido um plano de testes que contemplava a fusão dos tarugos acima mencionados, em várias condições de atmosfera controlada, a saber:

- Apenas vácuo, máximo de $1x10^{-2}$mbar (0.0076Torr);
- Limpeza com vácuo e introdução de gás inerte até á pressão máxima de 900mbar (684Torr);
- Limpeza com vácuo e introdução de gás inerte acima da pressão atmosférica até 2 bar ($2x10^{5}$Pa);
- Utilização de vários gases inertes: Árgon, Hélio e SF6;
- Introdução de gás inerte em continuo após limpeza com vácuo.

O vácuo era realizado através de duas bombas primárias ligadas à câmara em paralelo. A pressão de vácuo nominal é de $1x10^{-4}$ (0.000076Torr), porém o vácuo máximo atingido nestas condições era de $1x10^{-2}$mbar (0.0076Torr).

A razão para a incompatibilidade desta unidade com as condições de fusão pretendidas, é o resultado da quebra dieléctrica dos gases e do ar, devido à elevada tensão na bobine. A quebra dieléctrica provocava o aparecimento de alguns efeitos, mais tarde identificados como *"Glow Discharge"* e efeito de *"Corona",* tipo arco eléctrico no interior da câmara, que corta a potência na bobine e não permite fundir o metal, figuras 5.20 e 5.21. Outra consequência indesejada provocada por estes efeitos é a perfuração do cadinho pelos arcos, criando zonas frágeis e de iniciação de fissuras. Estes fenómenos podem também ocorrer na natureza, e não são exclusivos de atmosferas inertes ou em vácuo. Estes efeitos foram identificados com a ajuda das referências [7, 13, 14], e podem ser verificadas através da figura 5.22.

Figura 5.20 – Efeito "Glow Discharge" durante a fusão: 1ª em qualquer ponto da gama de vácuo possível e com ar, 2ª em atmosfera de Ar a 800 mbar (608 Torr).

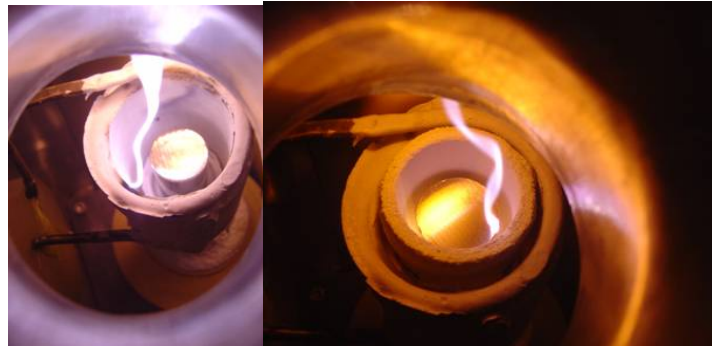



Figura 5.21 – Efeito de *“corona”* em atmosfera de Ar 800 mbar (608 Torr).

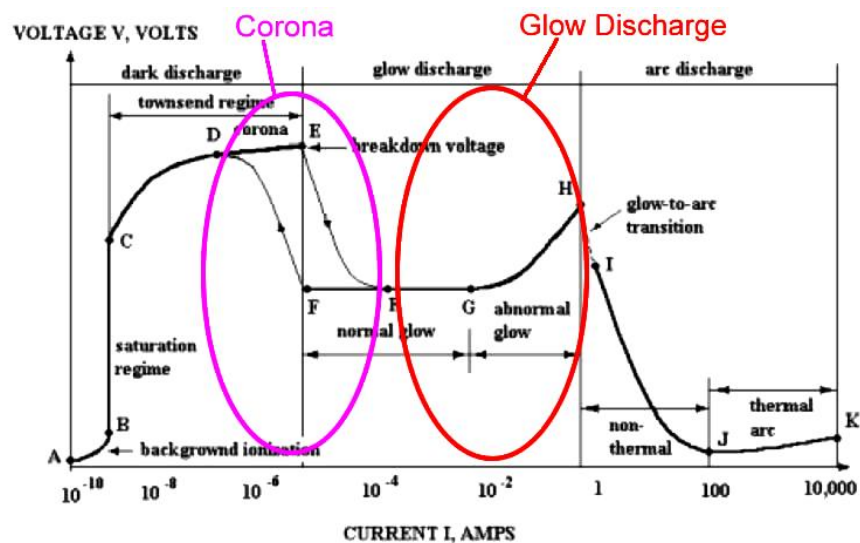



Figura 5.22 – Efeitos eléctricos mediante as características da corrente eléctrica [14].

Este forno de radiofrequência do INEGI, serviu ainda para a realização de testes a bobines de diferentes geometrias. Estes testes foram importantes na comprovação dos conhecimentos adquiridos na bibliografia, e na aprendizagem na construção de bobines.

Paralelamente, era utilizado um outro forno de radiofrequência a válvulas pertencente ao IFIMUP, de 100kW de potência e 100kHz de frequência, que usa cadinhos frios para a fusão, figura 5.23. Este é único forno onde o consórcio tem a possibilidade de realizar testes em atmosfera controlada e sem contaminação através do cadinho. Este forno permitiu o contacto e a aquisição de conhecimentos com a tecnologia dos cadinhos frios. O forno possui dois cadinhos que podem ser utilizados em separado, com capacidades diferentes: $16{,}8\times10^{-5}m^3$ para o maior, e $1\times10^{-4}m^3$ no caso do mais pequeno. A capacidade máxima deste forno é de $1\times10^{-3}m^3$.

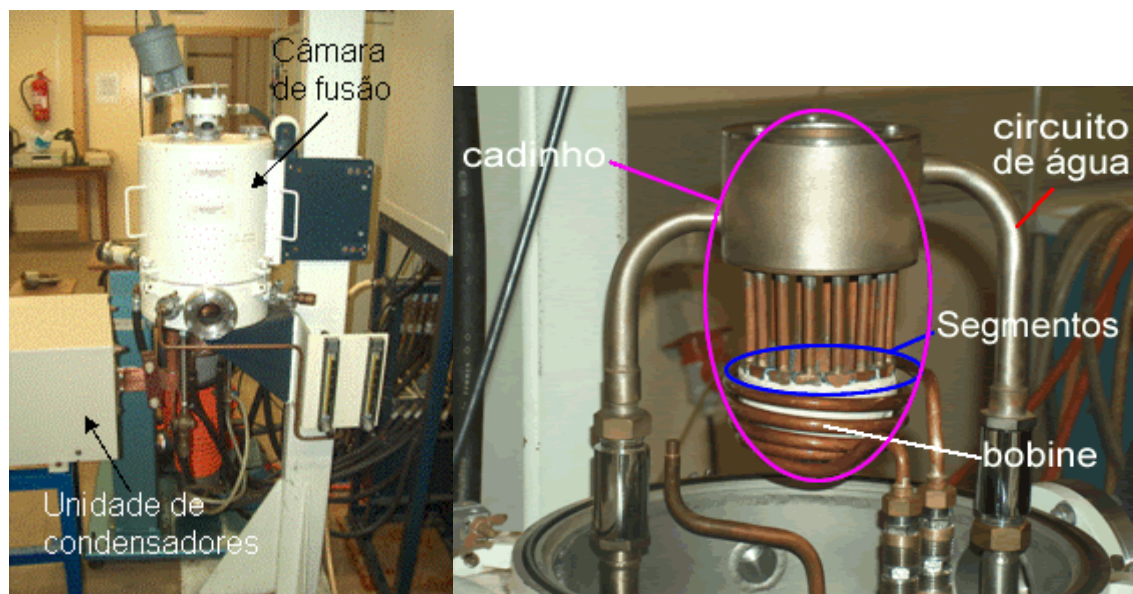



Figura 5.23 – Forno de cadinhos frios do IFIMUP. Cadinho frio de maior volume do forno do IFIMUP.

A fusão de cerca de 350g de Ti neste forno demora cerca de 180 a 240seg, no cadinho de maior capacidade. Neste forno, e para estas quantidades consegue-se a levitação do metal no interior do cadinho.

Antes do início deste trabalho, foram ainda efectuados testes num forno de indução de THYRISTOR da Zollern GbmH (Alemanha) de 200kW a 4kHz. A utilização deste forno foi no âmbito de testes de fusão e vazamento de maiores quantidades de Ti (cerca de 2.5kg), em cadinhos cerâmicos. Este forno é usado para a fusão de INCONEL, utilizado na obtenção de turbinas da zona quente dos turbocompressores para automóveis.

Foram utilizadas barras de 70mm de diâmetro com 140mm de comprimento na fusão. Devido à baixa frequência, havia uma excessiva agitação do metal no interior do cadinho, fazendo-o sair pelo topo deste que não era tapado. O facto de este forno estar afinado para 1,5Kg de INCONEL, explica este fenómeno, uma vez que a densidade desta liga é o dobro da de Ti. Por outro lado, não foi possível afinar o forno para esta quantidade de Ti, por obrigar à paragem de uma linha de produção.

Já no decorrer deste trabalho, foram estabelecidos contactos com vários fornecedores de sistemas de aquecimento por indução. Estes contactos revelaram-se importantes porque permitiram o contacto com outros tipos de sistemas.

Numa fase mais avançada deste processo, foi possível em dois destes fornecedores a realização de testes nas suas instalações e com o acompanhamento técnico de especialistas. A realização destes testes revelou-se de extrema importância, na consolidação de todo o conhecimento adquirido até então, através da combinação

de diferentes parâmetros, tais como: potência, frequência, geometria das bobines, quantidade de material e tipos de material (aços, titânio e ferro fundido). Nos dois fornecedores, foram testadas unidades de potência de tecnologia MOSFET, com potências de: 45kW, 50 kW e 100kW. Esta visita foi determinante na escolha da unidade de potência a fusão a adquirir e do seu fornecedor.

5.2.2 – CONCEITO DO FORNO E TECNOLOGIA DE FUSÃO

O conceito forno adoptado neste projecto baseia-se na tecnologia de fusão com recurso às pressões diferenciais. A adopção deste conceito deve-se também aos trabalhos levados a cabo pela Zollern GbmH, para a adaptação desta técnica aos fornos de fusão em vácuo usados na produção com ligas de Inconel. Baseados nos resultados destes trabalhos realizados na Zollern GbmH e nas vantagens desta técnica, apontadas no ponto 4.2.4.3, principalmente no que diz respeito à facilidade de implementação associada aos bons resultados do ponto de vista da espessura das paredes dos fundidos, a ZCP e o INEGI adoptaram também o conceito das pressões diferenciais no âmbito do projecto COMTICAST.

Os conceitos gerados do forno de fusão foram assim baseados num protótipo que estava a ser testado na Zollern GbmH. O forno usado, figura 5.24, é constituído por uma câmara de vácuo (principal), no topo da qual está um quartzo em forma de sino, e o fundo é um prato móvel onde são colocadas as moldações a serem vazadas. O prato sobe, e fecha moldação com o cadinho no topo superior no interior da câmara de fusão.

O conceito deste protótipo tem como base este forno de fusão em vácuo, e consiste na colocação de uma câmara de vácuo secundária (de vazamento) no prato móvel. Nesta câmara é colocada a moldação, que é fechada no topo superior por uma peça que leva o cadinho. O prato sobe e fecha a câmara secundária no interior da câmara principal (de fusão). As câmaras encontram-se separadas por um fusível entre a base do cadinho e o topo da câmara secundária É realizado o procedimento normal de vácuo na câmara principal, e na câmara secundária é ligado uma segunda tomada de vácuo, para estabelecer o diferencial de pressões entre as câmaras, figura 5.24.

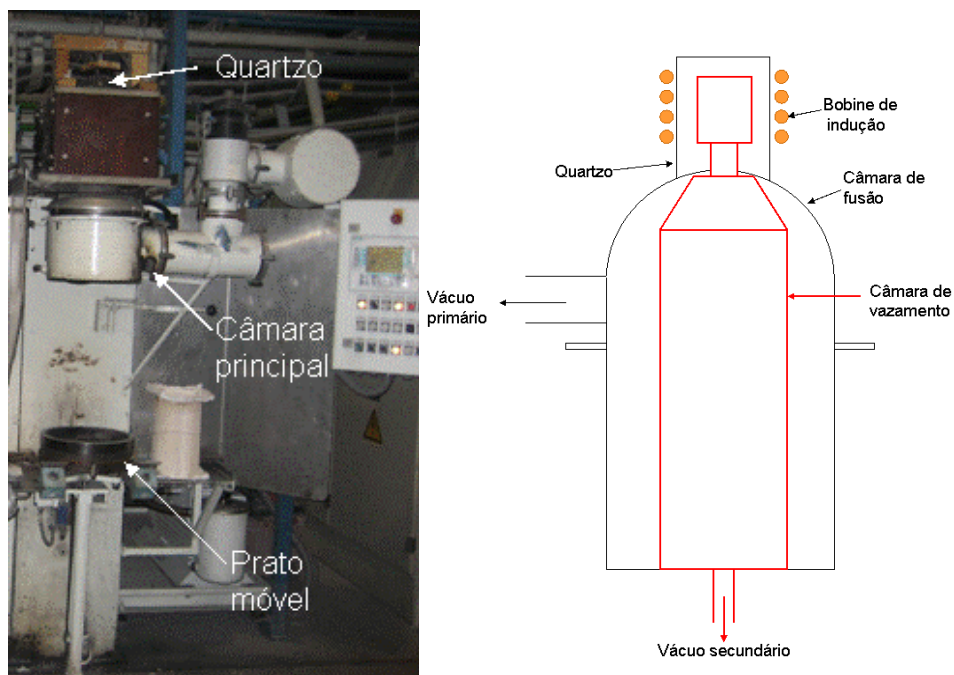



Figura 5.24 – Forno de fusão e vazamento em vácuo de ligas de Inconel da Zollern GbmH. Esquema do protótipo usado na Zollern GbmH.

No sentido de complementar esta informação, e iniciar o projecto de um forno dedicado à fusão de ligas de Ti, foram efectuadas por ordem cronológica as seguintes pesquisas:

- Conceitos de fornos de fusão e vazamento em pressões diferenciais;
- Conceitos para estabelecer as pressões diferenciais entre câmaras;
- Materiais de construção;
- Sistemas de accionamento dos mecanismos móveis.

Estas pesquisas resultaram na geração de um ou mais conceitos e a escolha de um conceito final.

Ao nível dos conceitos de fusão e vazamento com recurso a pressões diferenciais por gravidade, foi identificado que esta técnica utiliza, de uma forma geral, duas câmaras onde são estabelecidas pressões diferentes no momento do vazamento. Como foi referido no capítulo 4, grande parte dos sistemas que conjugam o vazamento em gravidade com pressões diferenciais, foram identificados na produção de próteses dentárias, como se pode constatar nas referências [19, 22, 27].

A nível Industrial foi encontrada uma patente [17], onde foi identificado um processo e princípio de funcionamento muito semelhante ao protótipo em uso na Zollern

GbmH e adoptado no projecto COMTICAST. Curiosamente, a patente europeia não engloba Portugal, e não foi encontrada a patente a nível mundial.

O objecto desta patente, é um forno de fusão de ligas de TiAl, por indução e em vácuo, constituído por duas câmaras independentes dispostas verticalmente, figura 5.25.

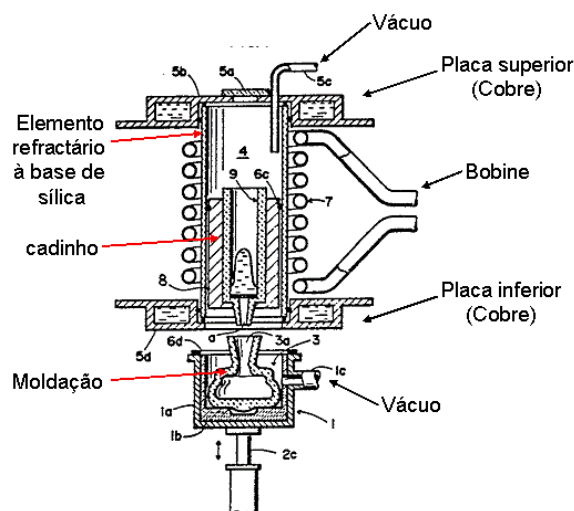



Figura 5.25 – Processo de fusão e vazamento patenteado pela Daido através da Patente europeia nº 0 387 107 A4 de 1990, [17].

A câmara superior é constituída por duas tampas de material condutor, tipo cobre, refrigerado a água, e o corpo é à base de um material refractário do tipo sílica. O fundo desta câmara é aberta para permitir que o cadinho colocado no topo da moldação, seja posicionado no interior do corpo. A moldação é colocada numa câmara inferior que fecha na anterior para a realização do processo de fusão e vazamento.

A patente apresenta também vários processos de ligação entre o cadinho e a moldação, tal como o uso de um fusível, uma válvula ou uma ligação directa entre eles. Apresenta ainda a solução de uma moldação constituída por cadinho e peça. Todos os processos de fusão apresentam o uso de vácuo como ajuda no vazamento das peças. É ainda defendido o aquecimento por indução do metal na zona da moldação numa fase posterior ao vazamento, como método que permite manter o metal líquido durante mais tempo e assim garantir o enchimento de partes mais finas das peças.

Foram ainda identificados outros métodos que usam o diferencial de pressões como técnica de apoio ao vazamento, nomeadamente os processos em contragravidade da Hitchiner e Daido referidos também no capítulo 4, referências [5, 9, 11, 20].

Para o estabelecimento do diferencial de pressões entre as duas câmaras, foram identificadas três técnicas distintas:

- O uso de um canal de passagem estreita entre as duas câmaras, que é fechado quando o metal fundido cai sobre ele, vedando-o e permitindo que se estabeleça uma diferença de pressões por aplicação de vácuo em continuo à câmara inferior, [19, 22];
- O uso de válvula entre o cadinho e a moldação;
- O uso de uma peça metálica, tipo chapa, de forma circular que veda a passagem entre as duas câmaras e à qual, de um modo geral se dá o nome de fusível (ou “penny”), figura 5.26.

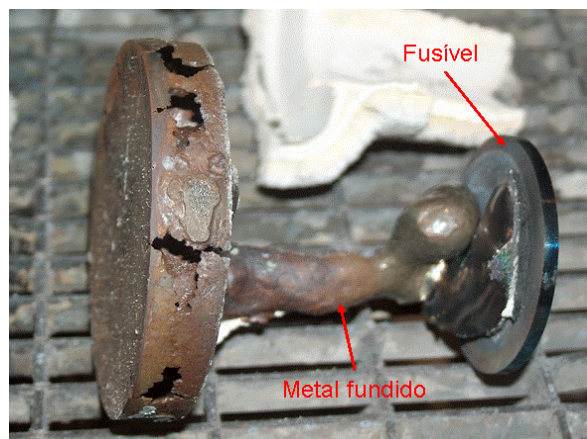



Figura 5.26 – Fusível que não fundiu em contacto com metal fundido.

Na última técnica, foram identificados diferentes tipos de fusível, tal como se indica nas referências [4, 9]. Porém, o fusível neste tipo de sistemas não é apenas utilizado para o estabelecimento de pressões diferenciais. A sua principal função é ajudar a atingir o maior sobreaquecimento possível do metal fundido, através da retenção do metal líquido dentro do campo magnético até que o próprio fusível funda. Este atraso no vazamento do metal líquido depende da espessura do fusível, ou do tipo de material. Este último factor tem maior influência no sobreaquecimento, principalmente quando se utiliza um material com ponto de fusão diferente do material a fundir. Outro factor importante que foi identificado como influente no sobreaquecimento do metal, foi o posicionamento do metal a fundir no interior da bobine. Este parâmetro vem confirmar a importância do correcto posicionamento da carga na bobine, tal como já tinha sido referido no ponto 5.2.1 [4, 21, 22].

Foi também identificada, a dependência da sanidade dos fundidos da diferença de pressões utilizada e do sobreaquecimento. Se por um lado um valor mais elevado do

diferencial de pressões ajuda ao enchimento de zonas finas das peças, por outro lado vai provocar maior porosidade no interior dos fundidos. É portanto necessário estabelecer um compromisso para o valor deste diferencial, de modo a evitar porosidade no interior dos fundidos, mas a garantir que zonas finas das peças fiquem totalmente cheias.

Por outro lado, conseguir o maior sobreaquecimento do metal líquido, permite reduzir o diferencial de pressões necessário para garantir o total enchimento das peças [21, 28]. Assim, o sobreaquecimento desempenha um papel fundamental na fusão e vazamento deste tipo de ligas de baixa fluidez. Como já foi referido no ponto 5.2.1, para se conseguir atingir um valor de sobreaquecimento desejável do metal líquido, é essencial concentrar todo o campo magnético no volume total de metal a fundir. Para isso, é importante minimizar as perdas do campo magnético para os elementos adjacentes, tais como: o corpo do forno, a bobine e a própria água que circula na bobine [24].

Por esta razão, e porque está em causa uma aplicação estrutural onde se pretende resistência mecânica, os materiais metálicos a utilizar devem ser não magnéticos e bons condutores eléctricos. Deste modo minimiza-se a captação do campo magnético provocado pela bobine por parte da estrutura por um lado e diminuímos o aquecimento por efeito Joule pelo outro. Outro aspecto importante destes metais é a resistência à corrosão provocada pela exposição a uma caudal de água constante, uma vez que estes elementos estruturais, pela proximidade a que se encontram da zona de aquecimento ou pelo seu próprio aquecimento devido à exposição ao campo magnético, são refrigerados. Alguns materiais metálicos não magnéticos e resistentes à corrosão, apontados como possíveis de serem utilizados nestas aplicações são [24]:

- Ligas de alumínio;
- Ligas de cobre;
- Ligas de latão;
- Aços inoxidáveis;
- Ligas de Ti;

- o Ligas de níquel (Inconel).

A escolha da liga a adoptar deve seguir um compromisso entre as suas propriedades (eléctricas, magnéticas e mecânicas), e o seu custo de obtenção e fabrico, de modo a cumprir o melhor possível a sua função,

Ainda no que diz respeito ao sobreaquecimento do metal, foi identificada uma técnica de fusão e vazamento que consiste no ajuste da bobine de indução em altura, à medida que a fusão do metal vai decorrendo, figura 5.27.

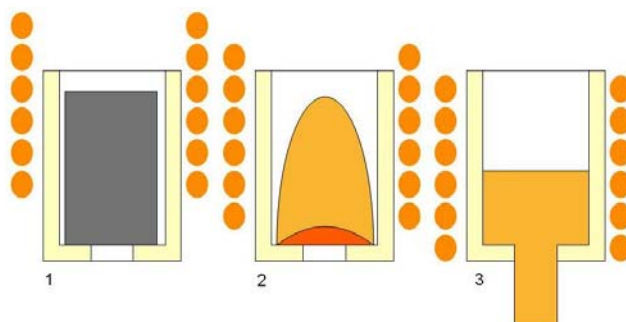



Figura 5.27 – Técnica de "single shoting" com adaptação da bobine à fusão do metal. Adaptado da referência [3].

Esta técnica permite o controlo do vazamento e o controlo do sobreaquecimento do metal [10]. Outra característica é a eliminação do fusível para estabelecer o diferencial de pressões entre as câmaras de fusão e vazamento, o que a torna ainda mais interessante por facilitar o processo e permitir ainda maior controlo sobre a fusão e subsequentemente sobre o sobreaquecimento. O conhecimento desta técnica permitiu adoptar um sistema de controlo da posição da bobine em altura no sistema de fusão e vazamento desenvolvido.

Foram assim gerados 5 conceitos prévios para o forno de fusão e vazamento, baseados no conceito de duas câmaras dispostas verticalmente, uma de fusão (em cima) e outra de vazamento (em baixo), e que se encontram separadas por um elemento intermédio responsável pela separação física das câmaras onde é colocado o fusível.

Todos os conceitos incluem um tubo de quartzo que separa a bobine, do cadinho à imagem do princípio usado na Zollern GmbH. Este sistema garante maior segurança na fusão do Ti, tal como já visto no capitulo 4.3.

Outro aspecto que foi tido em conta no desenvolvimento destes conceitos foi a capacidade de fusão de diferentes quantidades de metal de acordo com a métrica número 1 (fusão de quantidades entre as 200g e os 5kg de Ti). Assim, foi adoptado

para todos os conceitos gerados, que a câmara de fusão estaria fixa e a câmara de vazamento seria móvel para permitir introduzir as diferentes carapaças e os respectivos cadinhos, de acordo com a quantidade de Ti a fundir.

A referência para o dimensionamento dos conceitos gerados foi as dimensões da moldação de 6 turbinas de 99mm de diâmetro (500mm de altura total com pia de vazamento, por 250mm de diâmetro), que equivale a cerca de 5kg de Ti. Estas dimensões permitiram definir a câmara de vazamento, para todos os conceitos gerados.

Outro requisito foi a dimensão das câmaras, de modo a reduzir o tempo necessário para efectuar a limpeza destas com vácuo antes da fusão. Este requisito era também importante na definição das características das bombas de vácuo a adquirir, uma vez que quanto maior fosse o volume a limpar maior teria de ser o caudal das bombas a adquirir, e maior seria o seu custo. Ambas as câmaras de veria ter ligações de vácuo, na de fusão era realizado o vácuo principal, para limpeza, e na de vazamento era realizado o vácuo que permitia o diferencial de pressões.

No primeiro conceito, figura 5.28, houve uma tentativa de reduzir o volume interno da câmara de fusão com a introdução no seu interior da falange de ligação entre as câmaras.

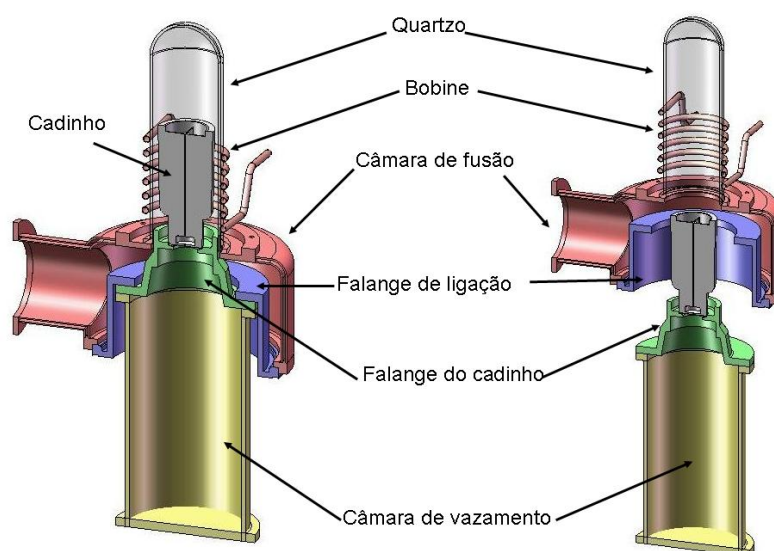



Figura 5.28 – Conceito 1.

Este conceito obrigava a muitas vedações entre a câmara de vazamento, a falange que suportava o cadinho e a falange de ligação. A falange de ligação, era um elemento amovível, que estava fixo à câmara de fusão através de ligações ISO K,

usadas nos sistemas de vácuo. Do ponto de vista mecânico, este conceito aparentava ser menos resistente no elemento de ligação. Este era responsável por suportar a força para a vedação entre as câmaras e a falange do cadinho, e sujeito a temperaturas elevadas. O fusível era colocado no topo da falange do cadinho, na base do cadinho.

O conceito 2, figura 5.29, visava compensar a falta de resistência do conceito anterior. Assim, a vedação da câmara de fusão com o exterior passava a ser feita com uma falange soldada, a meio do corpo da câmara de vazamento. A vedação entre as câmaras era feita no interior da câmara de fusão, pela ligação da falange do cadinho no topo da câmara de vazamento.

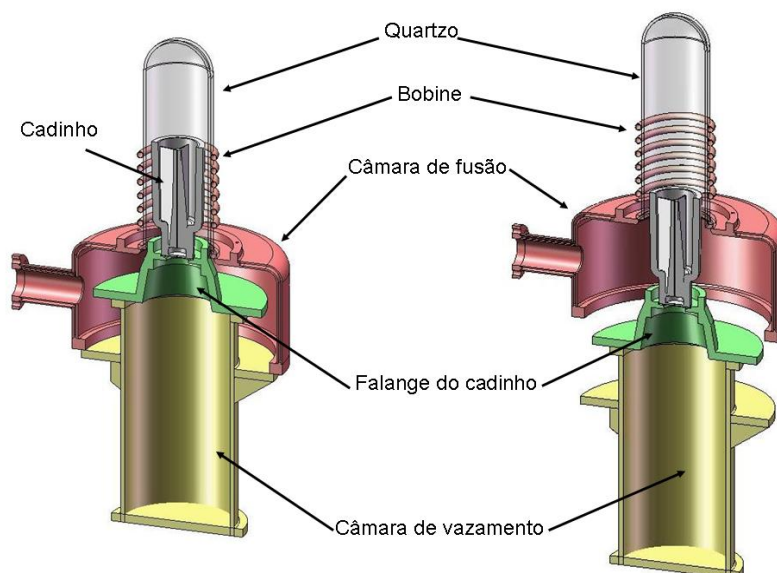



Figura 5.29 – Conceito 2.

Este conceito obrigava a um aumento de volume da câmara de fusão. Do ponto de vista mecânico, a colocação da falange de vedação no exterior no corpo da câmara de vazamento podia ser causa de problemas. O constante aquecimento deste elemento pelas moldações poderia provocar empenos na falange.

O conceito 3, figura 5.30, introduziu uma solução com a câmara de vazamento constituída por duas partes. Esta solução permitia a fusão de peças de menor volume, sem a necessidade de utilizar de uma câmara de vazamento diferente, bastando fechar o fundo da metade superior desta câmara.

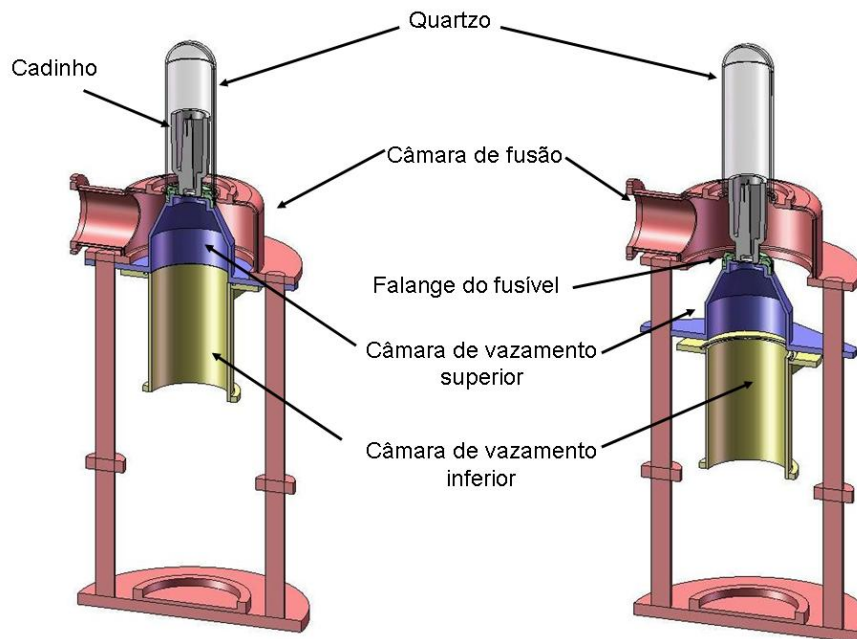



Figura 5.30 – Conceito 3.

A falange de vedação com o exterior passava para o elemento superior da câmara de vazamento, que entrava na de fusão e lhe diminuía o volume interno. As duas partes da câmara de vazamento eram fechadas entre elas previamente.

Outro conceito introduzido era a eliminação da falange do cadinho, que era substituída pela câmara de vazamento superior com uma nova falange (do fusível). Esta falange, figura 5.31, fechava a câmara de vazamento no topo, com a câmara de fusão. Era vista como um elemento de sacrifício, ou seja, seriam utilizadas várias alternadamente, em fusões sucessivas. Admitia-se que este elemento pudesse ser danificado por metal líquido, em caso de falta de resistência do cadinho.

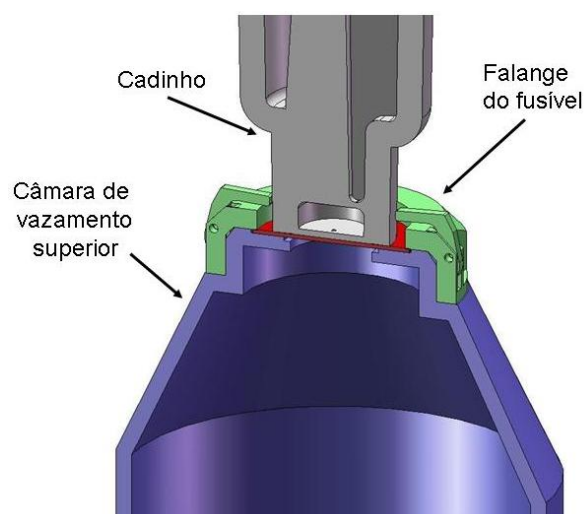



Figura 5.31 – Elemento de suporte do cadinho e do fusível, com um sistema de duas garras para aperto do cadinho.

O conceito 4, figura 5.32, quebra o princípio seguido nos anteriores, e foi pensado de forma a reduzir a câmara de fusão ao tubo de quartzo e ao tubo de ligação ao sistema de vácuo. Deste modo o volume da câmara de fusão era reduzido ao mínimo possível.

Era introduzida uma falange de vedação que seria o suporte da câmara de fusão, e onde era feita a vedação com a câmara de vazamento. Esta, por sua vez, voltava a ser fechada através da falange do cadinho.

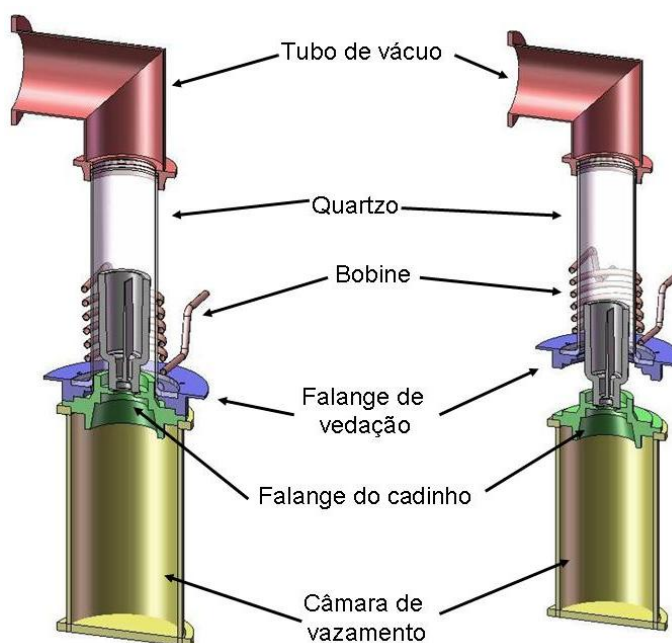



Figura 5.32 – Conceito 4.

Outra característica pensada para este conceito era facilitar a adaptação ao uso de cadinhos frios. O cadinho frio seria adaptado no topo da câmara de vazamento e entrava no quartzo quando o forno fosse fechado.

Este conceito obrigava a um bom isolamento contra a passagem das vibrações do sistema de vácuo para o quartzo.

O conceito 5, figura 5.33, foi o último a ser gerado, e resulta da combinação entre os conceitos 2 e 3. É aproveitada a solução da câmara de vazamento dividida: elemento superior e inferior. A câmara superior é fixa à estrutura e apenas o elemento inferior é alterado para ajustar a diferentes tamanhos de moldações.

O facto de esta parte superior estar fixa, facilita as ligações de vácuo e da água de refrigeração a esta parte da câmara.

Neste conceito, a falange do cadinho (onde é colocado do fusível), é também considerado elemento de sacrifício e assenta no topo da câmara de vazamento superior.

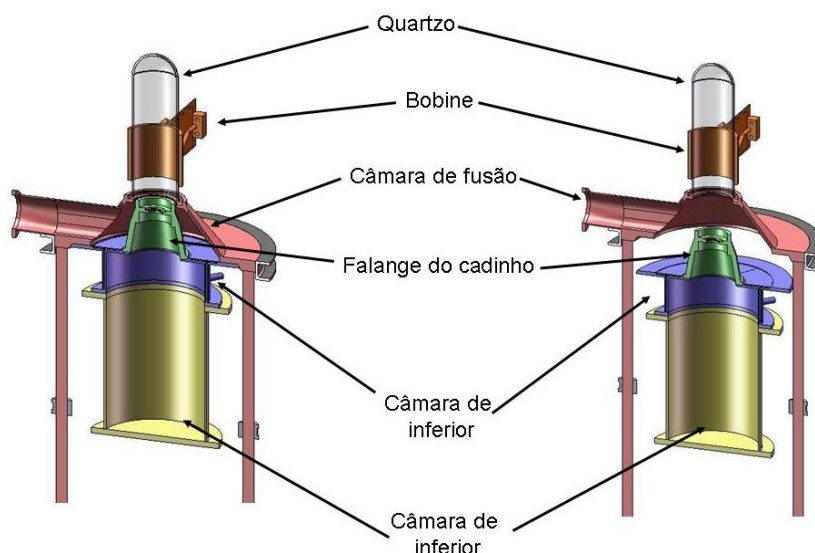



Figura 5.33 - Conceito 5.

Este foi o conceito escolhido para o desenvolvimento do forno de fusão e vazamento.

A solução da câmara de vazamento móvel e o ajuste da posição da bobine obrigaram, à definição de sistemas para a movimentação destes dois elementos. Foi elaborada uma tabela morfológica com as soluções possíveis a adoptar para a implementação destes sistemas. Para a movimentação destes dois elementos foram considerados sistemas de accionamento: hidráulico; pneumático; eléctrico e mecânico, segundo a tabela morfológica dos sistemas de accionamento do anexo B. Esta tabela permite uma visão clara sobre as possibilidades que cada um dos sistemas oferece, facilitando a tomada de decisão.

Ainda no que diz respeito ao processo de fusão e vazamento, foram realizados no âmbito deste projecto, testes ao conceito do fusível. Foi utilizado aço, pela impossibilidade de fundir Ti em vácuo. Para os fusíveis recorreu-se a chapa de aço (1mm) e folha-de-flandres. Foi utilizado o forno CALAMARI para a fusão, com recurso a uma pequena câmara de vácuo, figura 5.34.

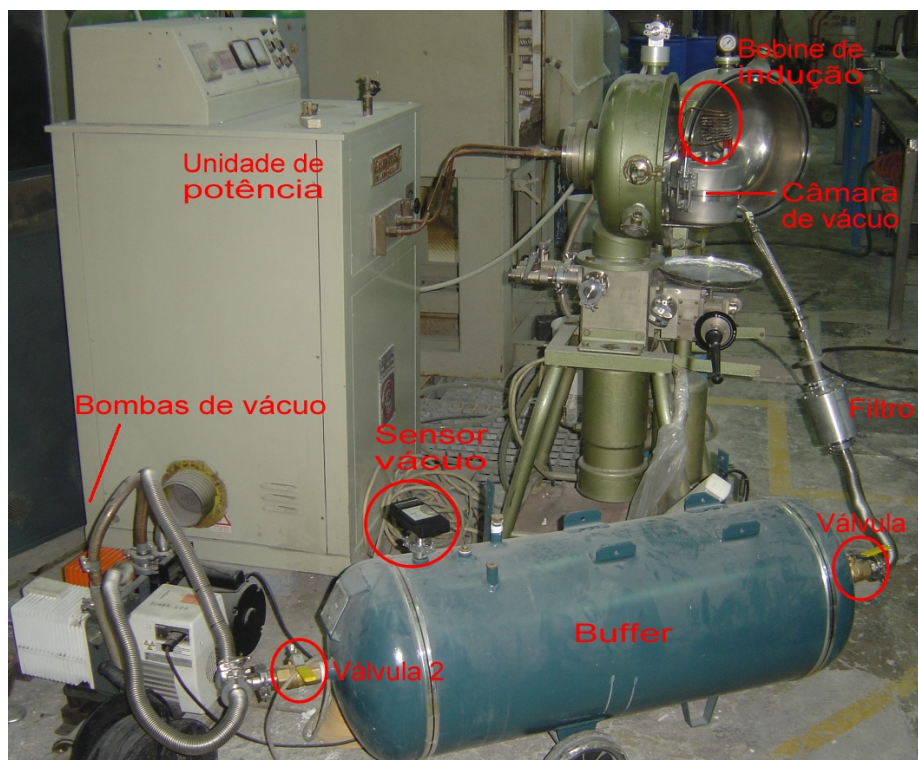



Figura 5.34 – Sistema para testes do conceito de vazamento com recurso a um fusível metálico.

A câmara de vácuo ligava a um reservatório, fechado na entrada e na saída por duas válvulas, que estava ligado a duas bombas de vácuo primárias. Entre a câmara e o reservatório, foi colocado um filtro para evitar a entrada de lixo nas bombas, e prevenir em caso de fissura na moldação, a passagem de metal. A pressão de vácuo era medida no reservatório, e era conhecida a perda de carga entre este e a câmara, 300mbar (228Torr).

O procedimento de fusão iniciava-se com o fecho da válvula 1 para a realização de vácuo ao reservatório, até se atingir a pressão desejada. Fechava-se de seguida a válvula 2, e abria-se a 1. Entretanto a fusão do metal já tinha sido iniciada. Com a fusão completa do metal, o fusível furava e o diferencial de pressão permitia o enchimento de peças.

A utilização da folha-de-flandres permitiu encher peças (turbinas de turbocompressores) com pressões entre os 300mbar - 150mbar (228 – 114Torr). Com o fusível de aço foram realizados menos tentativas e não se conseguiu encher nenhuma peça. A explicação, é a gola estreita do cadinho, que reduzia muito a área de contacto do metal fundido com o fusível.

Um dado importante recolhido da realização destes testes, é a importância da vedação entre o cadinho e o fusível, como se pode ver por comparação entre as figuras 5.35. A zona da gola do cadinho, está preenchida com fibra, que é suficiente

para criar a vedação necessária para que o diferencial de pressões seja estabelecido.

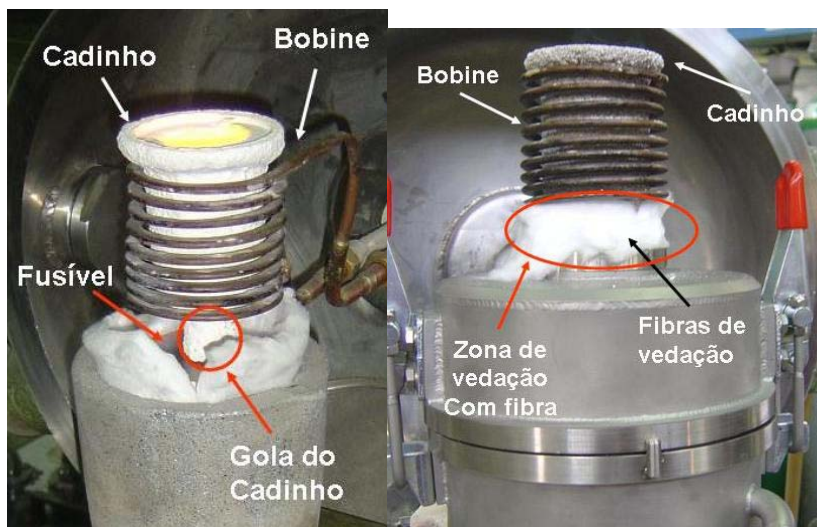



Figura 5.35 - Aspecto geral da montagem do cadinho na câmara de vácuo, com fibra a preencher o espaço da gola do cadinho. Aspecto da montagem entre fusível, cadinho e câmara de vácuo.

Apesar de estarmos a trabalhar com aço, estes testes permitiram adquirir sensibilidade para o diferencial de pressões criado entre a câmara e a atmosfera. Diferenças de pressão da ordem dos 150mbar (114Torr) são suficientes para encher peças com fusível de folha flandres, por outro lado 300mbar (228Torr), é pressão suficiente para o metal furar a carapaça cerâmica.

Estes resultados estavam de acordo com os resultados obtidos em testes de fusão de TiAl realizados na Zollern GbmH [21]. Estes testes utilizaram a técnica de pressões diferenciais, onde o diferencial de pressões variou entre:

- 50mbar (38Torr): com algumas peças mal cheias,
- 400mbar (304Torr): com muita porosidade no interior dos fundidos;

Os melhores resultados do ponto de vista de porosidade e enchimento de peças de paredes finas, foram conseguidos na gama de pressões entre os 150-200mbar (114 – 152Torr).

5.2.3 – SISTEMA DE VÁCUO

A tecnologia de vácuo é usada na investigação e em ambiente industrial como forma de promover e controlar ambientes de trabalho. As atmosferas de vácuo em termo de pressão, podem ir desde gamas vulgares, utilizadas por exemplo na indústria

alimentar, até gamas de vácuo extremas, utilizadas, por exemplo, em aceleradores de partículas. Na generalidade, a gama de pressões de vácuo é dividida do seguinte modo [2, 12, 26]:

- Baixo vácuo – desde a pressão atmosférica atá 1mbar (0.76 Torr);
- Médio vácuo – desde o 1mbar (0.76 Torr) até $1x10^{-3}$ mbar ($7.6x10^{-4}$ Torr);
- Alto vácuo – desde $1x10e^{-3}$ mbar ($7.6x10^{-4}$ Torr) até $1x10e^{-8}$ mbar ($7.6x10^{-9}$ Torr);
- Ultra alto vácuo – desde $1x10^{-8}$ mbar ($7.6x10^{-9}$ Torr) até ao limite mensurável de cerca de $1x10^{14}$ mbar ($7.6x10^{-15}$ Torr).

A capacidade de um determinado sistema de vácuo, atingir a pressão para a qual foi definido, depende muito do influxo de gás na câmara. Este resulta da soma dos seguintes factores [2, 12]:

1. Fugas para a câmara a partir do gás da atmosfera que a rodeia;
2. Desgasificação das paredes da câmara ou de qualquer outro material ou componente no seu interior;
3. Difusão a partir das bombas de vácuo, i.e. gás que passa da zona de bombagem para o interior da câmara;
4. Refluxo a partir das bombas de vácuo. Quando está presente um fluido (óleo), as moléculas deste são espalhadas devido à agitação da bombagem, podendo o gás aprisionado nestas moléculas retornar à câmara.

Os dois últimos pontos fazem-se sentir com maior intensidade nas gamas de alto e ultra alto vácuo, contudo um bom projecto do sistema de vácuo pode eliminar a 1ª, 3ª e 4ª causas de influxos.

A eliminação das fugas a partir da atmosfera que envolve a câmara, passa pela escolha correcta de vedantes e pelo projecto adequado destas zonas. Já no que diz respeito ao influxo por difusão ou por refluxo, estes podem ser reduzidos até níveis aceitáveis, ou mesmo eliminados para pressões de vácuo mais baixas, através da

utilização de *“traps”* frias (espécie de filtro), válvulas de corte na admissão do sistemas de bombagem, ou a escolha adequada do sistema de bombagem [12].

A realização de várias operações de manutenção ao forno de cadinhos frios do IFIMUP, que utiliza uma bomba rotativa líquida e uma bomba difusora com capacidade para atingir uma pressão de vácuo máxima de $1x10^{-9}$ mbar ($7.6x10^{-10}$ Torr), permitiu constatar a importância da qualidade das vedações, bem como adquirir conhecimento ao nível do projecto de vedações para este tipo de sistemas.

À semelhança do que acontece na tecnologia da bombagem de líquidos e gases em pressão, o dimensionamento deste tipo equipamentos, nomeadamente das bombas de vácuo, passa em primeiro lugar pela definição da pressão máxima de vácuo a atingir, e o caudal pretendido. A estas duas características, é necessário acrescentar ainda as seguintes:

- Pressão de vaporização dos constituintes dos materiais da câmara e dos componentes que vão estar sujeitos ao vácuo, responsável pela sua desgasificação;

- Geometria interna da câmara;

- Distância entre o sistema de bombagem e a câmara.

Existe uma vasta família de bombas de vácuo disponíveis para qualquer que seja a pressão de vácuo a atingir. Aquelas com as quais se trabalhou e que permitiram a aquisição de conhecimentos, foram as seguintes [26]:

- Bombas rotativas líquidas – usam palhetas, pistões, ou válvulas em óleo como método de captação do gás. As pressões máximas são de $1x10^{-4}$mbar ($7.6x10^{-5}$Torr). São também conhecidas por bombas primárias por serem usadas em combinação com outros tipos de bombas;

- Bombas rotativas secas (“roots”) – estas bombas são usadas principalmente em combinação com bombas rotativas líquidas e permitem grandes velocidades de bombagem, podendo atingir até 100,000m^3/h quando combinadas com outras “roots”. A pressão de vácuo máxima destas bombas isoladas é baixa, $<1x10^{-4}$mbar ($7.6x10^{-5}$Torr).

- Difusoras – estas bombas são usadas para atingir as gamas de alto e ultra alto vácuo. Este tipo de bombas também é conhecido como bomba de condensação, por este fenómeno estar envolvido na captação das moléculas de gás da câmara. Geralmente estas bombas trabalham combinadas com bombas primárias. A pressão de vácuo máxima é da ordem dos $1x10^{-9}$mbar ($7.6x10^{-10}$Torr).

No que diz respeito à escolha do sistema de bombagem correcto, todos os fornecedores contactados são unânimes, ao afirmarem da importância na correcta definição das características de bombagem pretendidas. Deve-se ter presente o aumento do custo destes sistemas, com o aumento da pressão máxima de vácuo e do caudal. Pressões que entrem na gama do alto e ultra alto vácuo requerem sistemas de bombagem que recorram à utilização de bombas difusoras (ou mesmo turbomoleculares), cujos custos são bem superiores às bombas rotativas. De um modo geral, na grande maioria das aplicações industriais as gamas de vácuo envolvidas são de baixo e médio vácuo [26].

Quanto à desgasificação dos elementos, esta ocorre nos líquidos e nos polímeros quando sujeitos a uma pressão de vácuo à temperatura ambiente. Nestas condições ocorre também a desgasificação de vapor de água que se encontra nas paredes dos diversos materiais, principalmente em sistemas que são abertos e expostos várias vezes às condições atmosféricas. Este é um factor a ter em conta no dimensionamento das bombas, e nomeadamente quando se pretendem pressões de vácuo mais elevadas. Por outro lado, o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão de vaporização dos elementos que constituem os diversos materiais, o que em condições de vácuo, pode conduzir à desgasificação destes elementos e à alteração dos materiais [2, 12]. Este é um pormenor muito importante a ter em conta no dimensionamento de sistemas onde estão envolvidas temperaturas e pressões de vácuo elevadas. É o caso deste projecto, onde há risco de alterar a constituição dos materiais sujeitos a temperatura elevadas, nomeadamente a liga de Ti a fundir, figura 5.36.

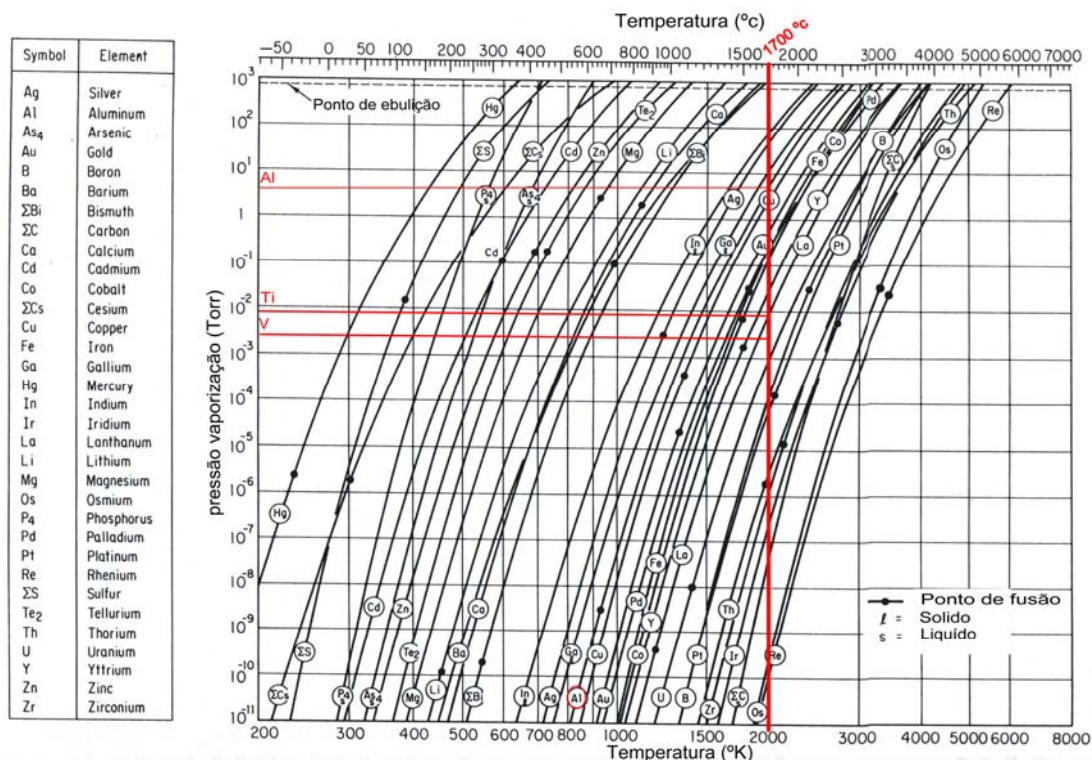



Figura 5.36 - Curvas da pressão de vaporização de alguns elementos mais comuns. Pressão de vaporização de: Al - 10mbar (7.6 Torr), Ti – 1.3 x10e^{-2} mbar (9.9x10e^{-3} Torr) e V –6.5x10e^{-2} mbar (4.9x10e^{-2} Torr) [12].

No que diz respeito aos materiais a usar na construção de câmaras de vácuo, grande parte da literatura consultada, [2, 12, 26] faz a diferença entre utilizações de até 1x10^{-6}mbar (7.6x10^{-7}Torr), e inferiores a esta pressão. O aço inoxidável e o vidro são os materiais referidos como possíveis de ser utilizados em ambas as gamas. Mais caro, o titânio, pode também ser usado em toda a gama. O alumínio ou aço macio são materiais muito utilizados na gama média baixa.

Ao nível dos vedantes, nas gamas mais baixas, o NBR, o silicone e o Neoprene são referidos, e por experiência própria com bons resultados. Para gamas maiores, até alto vácuo, o Viton é o preferido. Na gama de ultra alto vácuo as vedações com anilhas metálicas, é a solução recomendada [2, 12, 26, 29].

Nos sistemas de vácuo, o efeito das perdas de carga faz-se sentir com maior intensidade, mesmo na gama de médio vácuo. Assim o conhecimento exacto das perdas de carga existente nos sistemas, e a sua redução ao mínimo necessário, são factores preponderantes no seu dimensionamento.

Neste ponto, um outro factor de grande influência é a distância entre o sistema de bombagem e a câmara A variação de mais ou menos 1 metro nesta distância, pode obrigar à selecção de bombas de muito maior capacidade, mesmo na gama média, e ao consequente aumento do custo do sistema.

Também a geometria da câmara tem grande influência no tempo necessário para se atingir as condições de vácuo pretendidas. Devem ser adoptadas formas e geometrias livres de cantos e o mais arredondadas possíveis. A explicação resida na dificuldade de extracção de moléculas de gás destas zonas, onde estas têm tendência a acumular-se.

Nos testes realizados com a câmara BALZERS adaptada à unidade de potência do INEGI, foi possível verificar este efeito, com a acumulação de lixo em zonas da câmara com estas características. Nestes testes foram usadas duas bombas rotativas líquidas em paralelo que permitiam atingir a pressão de $1x10^{-2}$ mbar ($7.6x10^{-3}$Torr). A recuperação da câmara BALZERS, permitiu também o contacto com uma bomba difusora, que foi também recuperada, e que está disponível para poder ser usada no forno a desenvolver.

Devido à enorme gama de pressões de vácuo, que podem ir desde a uma pressão abaixo da pressão atmosférica até ao vácuo quase perfeito, não é de surpreender a grande variedade de sensores existentes. Destes, contudo, apenas alguns apresentam interesse no desenvolvimento de sistemas de vácuo para aplicações industriais. Por razões económicas, os sensores mais usados não medem pressão de vácuo directamente. O seu modo de operação é baseado na alteração de algumas propriedades físicas dos gases que estão directamente relacionadas com a pressão: condutividade térmica e eléctrica (para pressões até $1,3x10^{-3}$mbar ($9.9x10^{-4}$Torr), e a formação de iões positivos por colisão de electrões para pressões ainda mais baixas. A pressão lida pelos sensores, depende do gás em uso, uma vez que estão calibrados para ar ou azoto. Para outros gases existem tabelas com factores de correcção, que se podem encontrar em qualquer catálogo de produtos de vácuo [2, 26].

A gama de pressões desejada não é o único factor que se deve ter em conta na selecção de um sensor de vácuo. As condições de operação em que o sensor vai trabalhar também desempenham um papel importante nesta escolha. Sensores de Bourdon, sensores de vácuo de diafragma, sensores por condutividade térmica (o Pirani é o mais usado), sensores de ionização de cátodo aquecido e pennings são o tipo de sensores mais usados em ambientes industriais. No entanto, alguns destes são mais sensíveis as condições adversas que podem estar presentes nestes ambientes e que devem ser evitadas, tais como: o risco de ocorrer contaminação, vibrações, explosões, aspiração de água ou a subida de pressão para valores acima

da pressão atmosférica, [26]. É comum nos sistemas de vácuo onde se pretende atingir valores de alto ou ultra alto vácuo, o uso de vários sensores para a correcta leitura da pressão. A gama de leitura de um pirani, por exemplo, pode ir desde a pressão atmosférica até $1x10^{-4}$mbar ($7.6x10^{-5}$Torr), contudo só na gama entre os 1mbar (0.76Torr) e os $1x10^{-3}$mbar ($7.6x10^{-4}$Torr) é que o erro é de 1 a 2%, (fora desta gama a incerteza é maior). Para a leitura de pressões entre a pressão atmosférica e 1mbar (0.76Torr) recorre-se p.e. ao uso de sensores do tipo piezoresistivos, e abaixo dos $1x10e^{-3}$mbar ($7.6x10e^{-4}$Torr) aos pennings.

Durante os vários testes realizados houve a possibilidade de trabalhar com alguns destes sensores, nomeadamente piezoresistivo, piranis e pennings. A utilização destes sensores em separado, que se iam ligando à medida que se atingia a gama de leitura de cada um deles, permitiu constatar o que foi referido no parágrafo anterior. Actualmente são vendidas soluções, com dois sensores integrados, como por exemplo um piezoresistivo com um pirani que fazem a leitura continua da pressão.

Os conhecimentos mais importantes adquiridos com os testes no IFIMUP e no INEGI, foi no estabelecimento das condições necessárias para a não contaminação do Ti pela atmosfera em que a fusão decorre. Devido ao elevado tempo necessário para atingir pressões da ordem dos $1x10^{-3}$mbar ($7.6x10^{-4}$Torr), a realização de um procedimento que combina pressões de vácuo mais baixas 0.5mbar (0.38Torr), com a injecção de um gás inerte, repetido pelo menos duas vezes, permite a obtenção de uma atmosfera inerte onde o Ti fundido para um copo de cobre não apresenta contaminação. Com este procedimento de limpeza da câmara satisfaz-se a métrica nº 2, de obtenção de uma atmosfera inerte na fusão.

Relativamente ao desempenho das bombas de vácuo, este é extremamente prejudicado pela presença de sujidade, água ou humidade no seu interior. Isto acontece quer para as bombas secas como para as que trabalham com líquidos. Em ambientes agressivos, com pó, ou humidade, a colocação de filtros e a inspecção e mudança regular dos óleos deve ser realizada com frequência. No caso das bombas secas esta inspecção é mais difícil e deverá ser realizada por técnicos especializados.

Devido à enorme precisão, usada na construção e montagem destes sistemas, a presença de partículas sólidas no interior das bombas vai provocar o desgaste antecipado dos seus elementos interiores, e reduzir o tempo de vida destas. Já no

que diz respeito à humidade, a sua presença no arranque do sistema de bombagem ou em percentagem muito elevada, contamina o óleo com água de condensação. Esta água só é retirada do sistema quando este atinge a temperatura (110ºC) onde a pressão de vaporização da água é 1000mbar (760Torr). Contudo as bombas não trabalham normalmente a esta temperatura. Este fenómeno também ocorre se as bombas aspirarem directamente água que possa aparecer no sistema. Uma maneira de retirar esta água é a bomba trabalhara com a admissão fechada durante umas horas, assim a temperatura interior vai subir e vai ocorrer a vaporização da água. A presença de água no óleo dá-lhe uma cor amarelada baça.

Neste sentido, as bombas devem arrancar fechadas, alguns minutos antes de ser iniciado o processo de vácuo, para poderem atingir a temperatura de trabalho ideal, e evitando-se assim a condensação do vapor de água no seu interior.

5.3 – Pesquisa de Patentes e propriedade industrial

Durante a fase de pesquisas, foram também realizadas pesquisas ao nível de patentes sobre temas relacionados com a fusão e vazamento de ligas de Ti. Algumas das patentes mais relevantes que foram consultadas foram as seguintes:

Processos gerais:

- Pat: 2.806.271 – Process of casting titanium and related metal and alloys, (17.09.1957);
- Pat: 5.065.809 – Method for casting titanium or titanium-based alloy, (19.11.1991);
- Pat: 6.253.828 B1 – Method and casting device for precision casting, (03.06.2001);
- Pat: WO2005/025778 A1 – Process for obtaining TiAl pieces by casting, (24.03.2005);

Contragravidade:

- o Pat: 5.042.561 – Apparatus process for countergravity casting of metal with air exclusion, (27.04.1991).

- o Pat: EP0457502 A1 – Method and apparatus for precision casting of titanium or titanium alloys, (09.05.1991);

- o Pat: 5.193.607 – Method for precision casting of titanium or titanium alloy, (16.03.1993);

- o Pat: 5.303.762 – Countergravity casting apparatus and method, (19.04.1994);

- o Pat: EP0751361A1 – A levitation method and a levitation melting and casting devices, (12.04.1996);

- o Pat: 6.004.368 – Melting of reactive metallic materials, (21.12.1999);

Pressões diferenciais:

- o Pat: 3.863.706 – Metal casting, (04.02.1975);

- o Pat: 4.538.671 – Arc furnace for the production of small investment casting of reactive or refractory metals such as titanium, (03.09.1985);

- o Pat: EP0387107A2 – Method and apparatus for casting a metal, (13.03.1990);

- o Pat:5.513.693 – Method for casting low specific gravity metal with ultra-fine features using high differential pressure, (07.03.1996);

Centrifugação

- o Pat: 6.776.214 B2 – Centrifugal casting of titanium alloys with improved surface quality, structural, integrity and mechanical properties in isotropic graphite moulds under vacuum (17.08.2004);

Cadinhos frios:

- o Pat: 4.738.713 – Method for induction melting reactive metals and alloys, (19.04.1988);

- Pat: 5.090.022 – Cold crucible induction furnace, (18.02.1992);
- Pat: 5.275.229 – Magnetic suspension melting apparatus, (04.01.1994)
- Pat: 5.283.805 – Segmented cold-wall induction melting crucible, (01.02.1994);
- Pat: 5.280.496 – Induction furnace with cooled crucible, (18.06.1994);
- Pat: 6.993.061 B2 – Operating an induction apparatus, (31.01.2006).

Fusível:

Pat: 3.598.168 – Titanium casting process, (14.10.1971)

BIBLIOGRAFIA CAPÍTULO 5

[1].Alain (**2004**), *"Generateurs OTMP et GCTM - circuit oscillant parallele"*,CELES,pag.

[2].Livro - Barrington (**1964**). "High vacuum engineering". New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

[3].Livro - Beeley (**2001**). "Foundry Technology".

[4].Clark (**1968**), "Titanium casting process", Pat. Nº:3,598,168, **TRW Inc**, USA.

[5].Demukai (**1996**), "A levitation melting method and a levitation melting and casting device", Pat. Nº:EP 0,751,361 A1, **Daido**, Japão.

[6].Livro - Eppinger (**2004**). "Product design and development", Mv Graw Hill.

[7].Fellenberg (**2001**), "Plasma technology" Federal Ministry of Education and Research Bonn - Germany.

[8].Fiveceles (**2007**), *"Instructions manual for water cooling MOS transistors generators"*,fiveceles,pag.

[9].George D. Chandley; Amherst (**1992**), "Countergravity casting method and apparatus", Pat., **Hitchiner Manufactoring Co, Inc**, USA.

[10].Artigo - Gibson (**1998**). *"Induction heating for single shot melting processes."* Foundryman Vol. 91(23):pag. 23-28.

[11].Hitotsuyanagi (**1993**), "Method for precision casting of titanium or titanium alloy", Pat. Nº:US 5,193,607, **Daido Tokushuko**, Japão.

[12].Livro - Holland (**1974**). "Vacuum manual". Londres, E. & F. N. Spon Ltd.

[13].Induction. (**2007**). www.myinduction.com.

[14].Induction" *"Structure of Glow Discharge"*,www.myinduction.com,pag.

[15].INDUCTOHEAT, *Basics of induction Heating*. 2003, Inductoheat.

[16].Livro - Institute (**1977**). "Principles of induction melting", American Foundrymen's society cast metals institute.

[17].Isobe (**1990**), "Method and apparatus for casting a metal", Pat. Nº:0,387,107 A2, **Daido**, Japão.

[18].Kinsey (**2000**), *"Induction heating basics"*,Electroheat,pag: 39.

[19].Matsuda (**1996**), "Method for casting low specific gravity metal with ultra-fine features using high differential pressure", Pat. Nº:5,513,693, **U-Wa Tech Corporation**, Japão.

[20].Oles (**2004**), "Countergravity casting method and apparatus", Pat. Nº:US 6,684,934 B1, **Hitchiner**, USA.

[21].Paninski (**2006**), "Prozessvalidierung TiAl Feinguss" Access, Aachen.

[22].Artigo - R. G. Keanini (**2005**). *"Theorical model of the two-chamber pressure casting process."* Metallurgical and material transactions B Vol. 36B:pag. 283-292.

[23].s.r.l (**2002**), *"Industrials applications of induction heating"*,INDUCTION s.r.l.,pag.

[24].Livro - Semiatin (**1988**). "Elements of induction heating". Ohio, ASM Internationl.

[25].semiconductor (**2000**), *"Induction heating system topology review"*,Fairchild Semiconductor,pag.

[26].Livro - Umrath (**1998**). "Fundamentals of vacuum technology". Colonia, LEYBOLD.

[27].Waterstrat (**1985**), "Arc furnace for the production of small investment casting of reactive or refractory metals such as titanium", Pat. Nº: 4,538,671, **American Dental Association health Founddation**, USA.

[28].Artigo - Watkins (**1997**). *"Effect of pressure difference on the quality of titanium casting."* j Dent Res Vol. 76(3):pag. 773-779.

[29].Livro - Weingärtner (**1988**). "Vacuum arc skull melting and casting", ASM International, M. handbook, 15.

CAPÍTULO 6

PROJECTO E DESENVOLVIMENTO DO FORNO DE FUSÃO E VAZAMENTO

6- PROJECTO E DESENVOLVIMENTO DO FORNO DE FUSÃO E VAZAMENTO

O desenvolvimento e definição de um sistema para fusão e vazamento de ligas de Ti apresenta um conjunto alargado de desafios. Neste sentido, o trabalho desenvolvido é apresentado através da descrição das seguintes fases:

1. Apresentação do forno de fusão e vazamento: descrição geral do forno desenvolvido e descrição do funcionamento;
2. Escolha da unidade de potência: definição das características eléctricas da unidade de potência de acordo com os requisitos definidos anteriormente, selecção das bobines de indução e apresentação da unidade adquirida;
3. Definição e projecto do sistema de vácuo: definição do sistema de bombagem de acordo com os requisitos pretendidos e descrição do sistema de vácuo implementado;
4. Soluções de construção dos vários elementos: descrição do tipo de estrutura, materiais e construção adoptada para os vários elementos, dimensionamento, modelação 3D, simulação estrutural estática e escolha e dimensionamento dos accionamentos;
5. Definição e projecto do sistema de refrigeração: descrição do sistema de refrigeração e definição das necessidades de refrigeração do forno;
6. Definição das funções de segurança: definição das funções de segurança a implementar por hardware;

6.1 – FORNO DE FUSÃO E VAZAMENTO DE LIGAS DE TI

O princípio de funcionamento do forno assenta no conceito de pressões diferenciais entre duas câmaras que permita o enchimento de peças de paredes finas, (figura 6.1). Neste sentido foram desenvolvidas duas câmaras, uma de fusão, assente

directamente na estrutura principal do forno, e outra de vazamento que é móvel, e está posicionada verticalmente sob a primeira (figura 6.2).

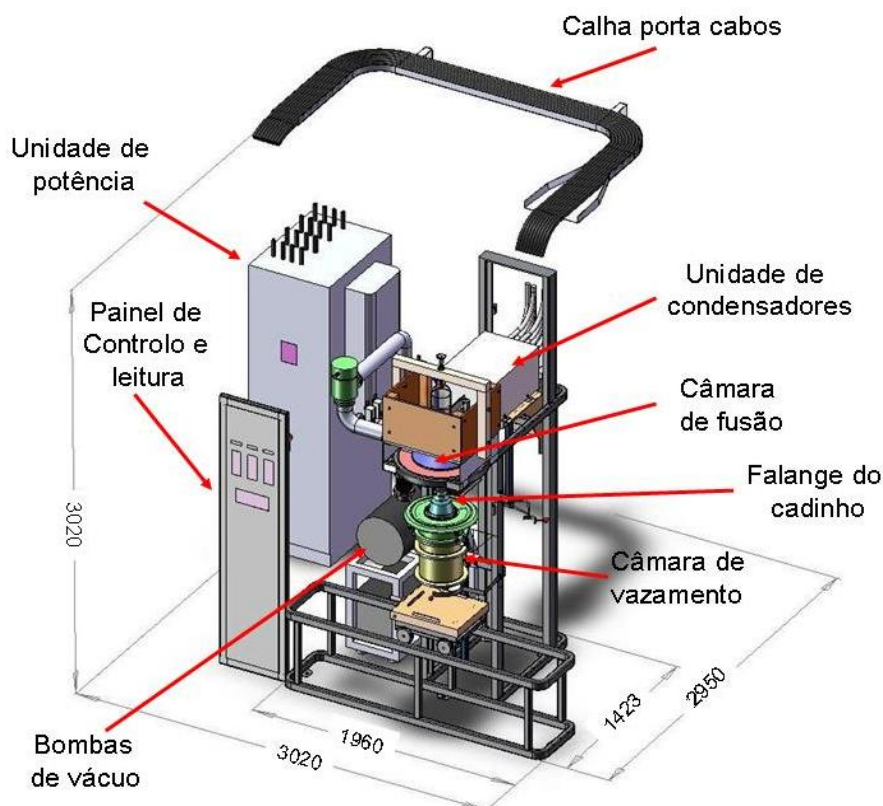



Figura 6.1 - Aspecto geral do forno de fusão e vazamento.

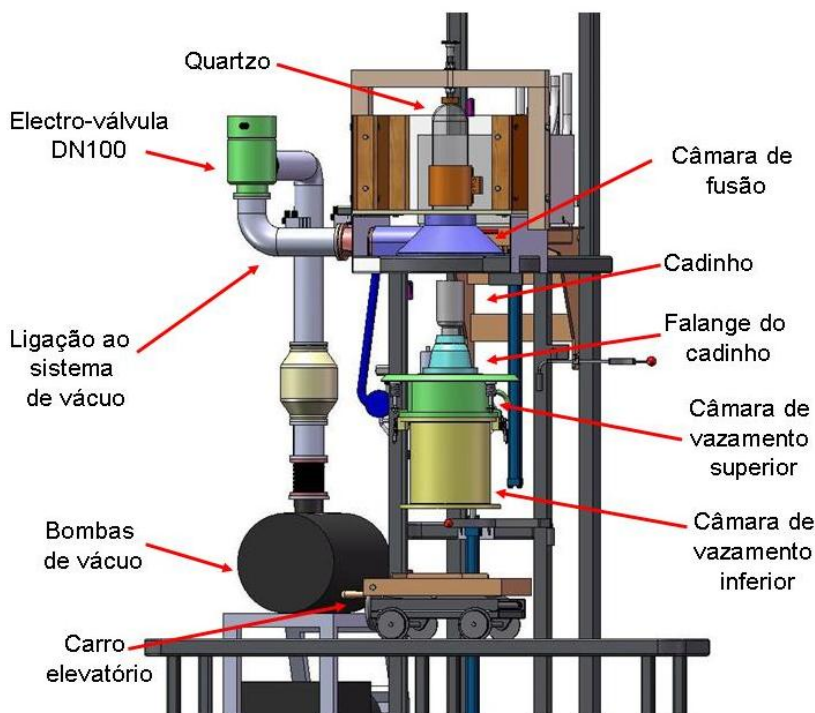



Figura 6.2 – Pormenor das câmaras de fusão e vazamento.

A câmara de fusão está rigidamente ligada à estrutura principal. A câmara de vazamento é um elemento móvel, constituído por dois elementos independentes: as

câmaras de vazamento superior e inferior. A câmara de vazamento superior, está assente numa estrutura que se move verticalmente ao longo de dois perfis da estrutura principal. Este elemento é actuado por um cilindro hidráulico.

A câmara de vazamento inferior, pode ser substituída por outros elementos para ajustar à moldação a utilizar, de acordo com os requisitos do projecto, que prevê o vazamento de 1 peça de Ø 65 mm a 6 peças de Ø 99 mm (métrica nº 1). As diferentes câmaras de vazamento são fixas à câmara superior através de dois grampos de fixação. Estão inicialmente assentes num carro elevatório, que as posiciona à altura correcta para serem apertadas à câmara superior. O posicionamento das câmaras em altura é manual, e é realizado através de sistema de manivela existente no carro elevatório.

O carro elevatório está assente na estrutura principal, na frente do forno. Esta estrutura permite montar a moldação num lado, fundir no meio, e retirar a moldação pelo lado contrário. Está pensada para poder ser utilizada de forma industrial, para produção em série, e de modo a facilitar as operações de preparação pré e pós fusão, como reflectem as métricas nº13 e 14.

O quartzo é fixo ao topo da câmara de fusão através de uma estrutura feita com vigas de madeira. Esta estrutura é revestida no interior com três placas de baquelite, que têm a função de protecção contra a radiação emitida durante a fusão.

A unidade geradora de potência, elemento mais à esquerda na figura 6.1, está ligada à unidade de condensadores por cabos eléctricos, que passam numa calha para cabos, posicionada atrás e por cima de todo o sistema. A bateria de condensadores está assente numa estrutura elevatória que se movimenta na estrutura principal. Esta estrutura, permite o ajuste da bobine em altura, para controlo da fusão do metal como foi visto no ponto 5.2.2 deste trabalho. Esta estrutura também é accionada por um cilindro hidráulico. Na sua extensão máxima, o cilindro posiciona a bobine acima do quartzo, tornando a operação de substituição deste, um processo fácil e rápido.

O sistema de bombagem de vácuo está posicionado lateralmente à estrutura principal, e assenta numa estrutura própria independente da estrutura principal do forno. O sistema de vácuo alimenta a câmara de fusão através da conduta principal com DN 100 (diâmetro interior 100mm), onde é feita uma derivação para uma tubagem DN 25 de ligação à câmara de vazamento. Em ambas as condutas de

ligação estão colocados sensores para leitura e controlo da pressão de vácuo no interior de cada uma das câmaras.

6.1.1 – PROCEDIMENTO DE FUNCIONAMENTO

O procedimento de funcionamento do forno de fusão e vazamento está detalhado no diagrama apresentado na figura 6.3 e no anexo B. À data de conclusão deste projecto de mestrado, a parte estrutural do forno encontra-se em fase de construção. Assim, ainda não está definido o grau de automatização do processo, pelo que algumas operações vão ser consideradas manuais pela necessidade que há em ganhar familiaridade com o processo e definir correctamente acções de todo o procedimento.

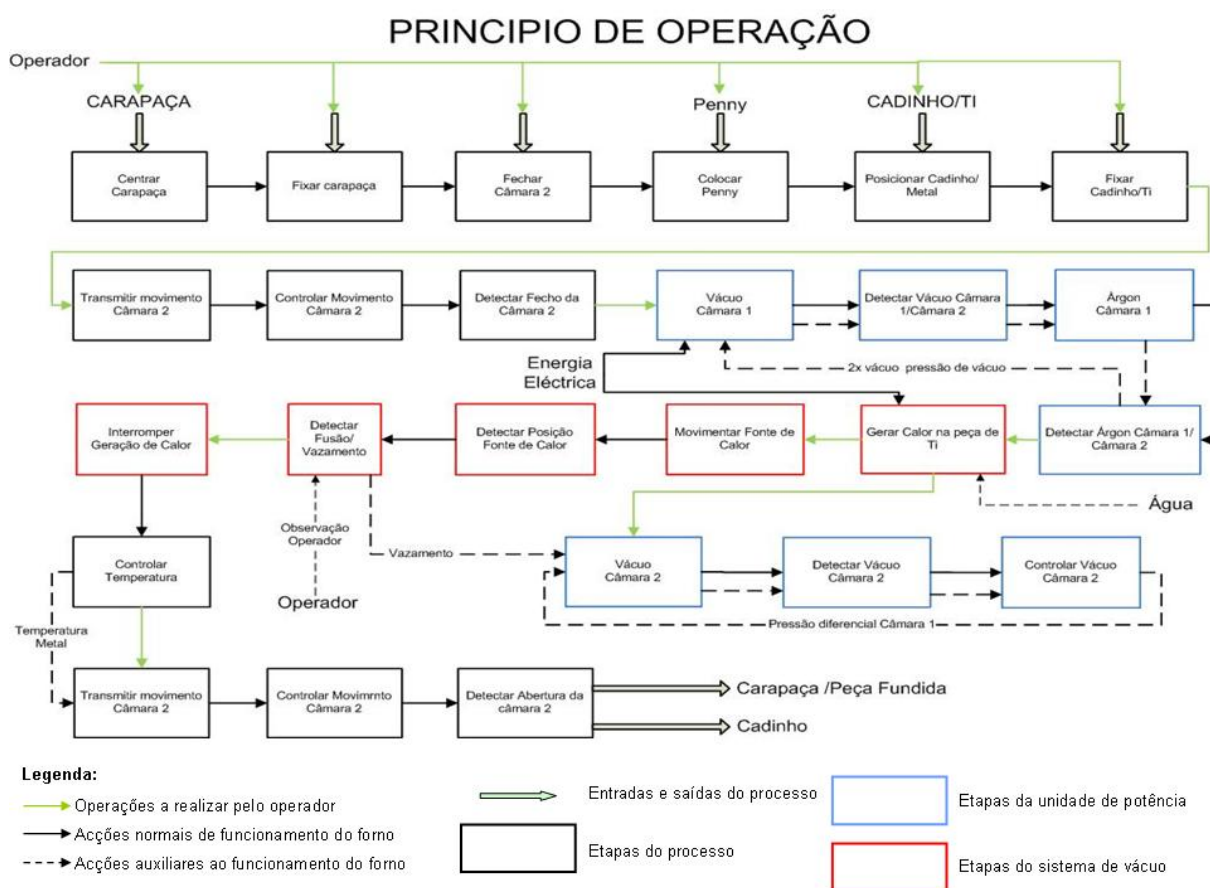



Figura 6.3 – Diagrama de funcionamento do forno de fusão e vazamento.

O processo de fusão inicia-se com o posicionamento da moldação no interior da câmara de vazamento inferior, que é depois posicionada concentricamente com a câmara de vazamento superior (figura 6.4 a).

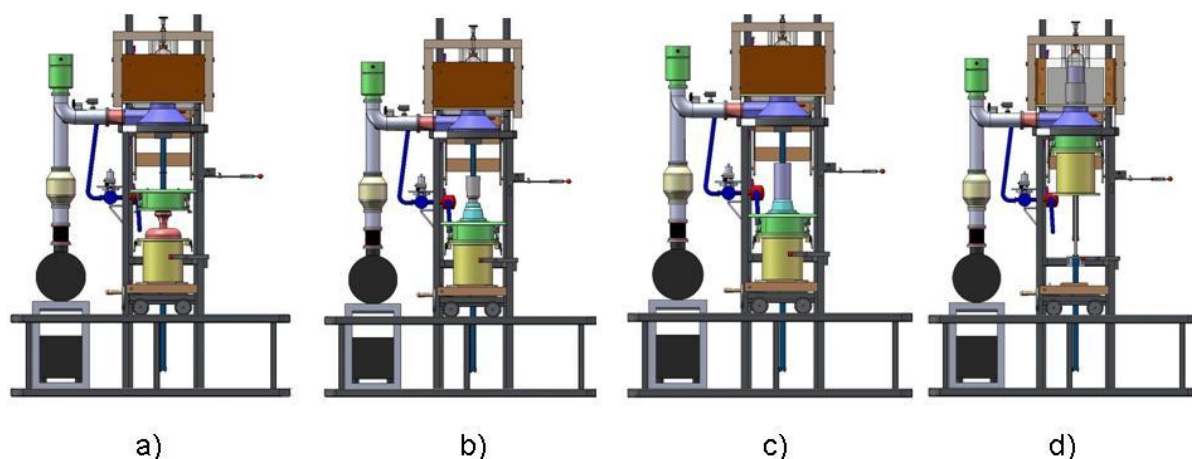



Figura 6.4 – Preparação do forno para o processo de fusão e vazamento.

A câmara de vazamento superior é descida até á posição que permite fechar a câmara de vazamento. No topo é colocada a falange do cadinho que é preparada previamente fora desta posição (figura 6.4 b).

De seguida é colocado um tubo de fibra (à base de sílica) a revestir o cadinho, para protecção do quartzo contra radiação emitida durante a fusão, e pequenas fugas de metal que possam ocorrer no caso de o cadinho partir (figura 6.4 c).

A câmara de vazamento é elevada até fechar a câmara de fusão, operação deve ser controlada pelo operador (figura 6.4 d).

A preparação da falange do cadinho, passa pela colocação do fusível e do cadinho com a barra de Ti no interior, no topo desta, tal como pode ser visto na figura 6.5. A gola do cadinho é revestida no exterior com fibras (à base de sílica e alumina), tal como foi explicado no capítulo 5.2.2., para uma melhor vedação desta zona.

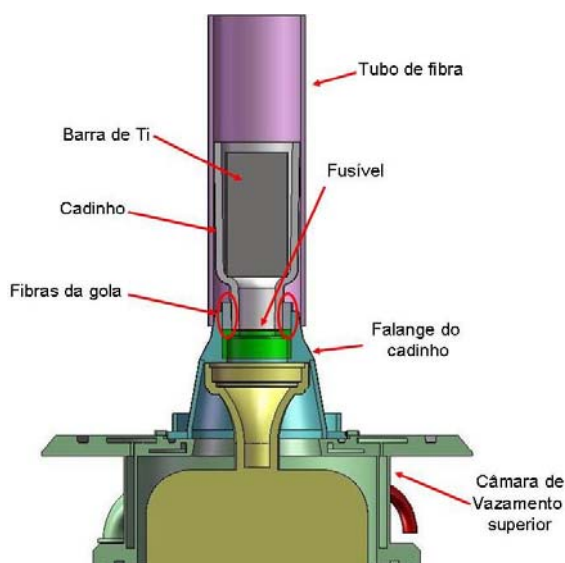



Figura 6.5 – Preparação da falange do cadinho, montagem na câmara de vazamento superior.

Com as câmaras fechadas, o operador deve dar início ao procedimento de limpeza da atmosfera interior das câmaras. Esta inicia-se com a realização de vácuo a ambas as câmaras até à pressão desejada, sendo então fechada a conduta de vácuo e é injectado Árgon (Ar). Quando a pressão de Ar é atingida, o processo de vácuo e injecção de Ar é repetido novamente. Com as condições de pressão de Ar pretendidas no interior da câmara de fusão, inicia-se o procedimento de fusão.

Na fusão podem ser adoptadas duas técnicas:

- O ajuste da posição da bobine antes de iniciar a fusão. Esta posição mantém-se durante a fusão;
- O ajuste gradual da posição da bobine, conforme a técnica vista no ponto 5.2.2.

Com o início do processo de fusão, dá-se também início ao procedimento que estabelece as pressões diferenciais entre as duas câmaras. Assim, podem ser adoptadas duas técnicas: apenas a realização de vácuo à câmara de vazamento, ou a realização de vácuo seguida de enchimento com Ar até à pressão desejada.

O tempo de fusão vai determinar se este procedimento decorre durante, ou antes da fusão. Em casos onde está envolvida uma massa de Ti considerável, o processo pode decorrer durante a fusão. Em casos em que essa massa é de alguma gramas, o tempo de fusão não permite a realização deste procedimento, pelo que este será realizado previamente. O procedimento de estabelecimento do diferencial de pressões vai ser definido, apenas com a realização dos primeiros testes ao forno.

O facto de o fusível com as fibras não serem completamente estanques, permite que a limpeza do primeiro procedimento de vácuo à câmara de fusão, se faça também sentir na câmara de vazamento.

O fim do processo de fusão é detectado pelo operador através da queda de potência na unidade, que interrompe a geração de potência e inicia o processo de arrefecimento da moldação vazada.

Existe um ante-projecto para o sistema de arrefecimento que não está completamente definido, á altura do término deste projecto. O projecto e implementação deste processo são propostos como trabalho futuro no capítulo 8.

Por fim e depois de aberta a câmara de vazamento inferior, o carro deve ser deslocado para uma posição lateral ao forno onde a moldação é retirada da câmara de vazamento inferior. Todo o processo pode então reiniciar-se.

6.2 – UNIDADE DE POTÊNCIA PARA INDUÇÃO

Como foi referido no ponto 5.2.1, foram efectuados vários contactos junto de fabricantes de sistemas de aquecimento e fusão por indução: Consarc (UK); Celes (França); Ameritherm (França); IEW (Áustria); ALD (Alemanha); IMES (Holanda) e Plustherm (Alemanha).

Aos fabricantes contactados foi pedido o envio de propostas de unidades de potência com a respectiva bobine de indução, para a fusão de uma determinada quantidade de Ti por unidade de tempo. Foi também mencionado que o sistema a adquirir adaptado a uma câmara de vácuo que estava a ser desenvolvida internamente.

Numa primeira fase, foram efectuados pedidos para a fusão em 60 s de uma barra circular de diâmetro 30mm por 55mm de comprimento (200g). Mais tarde já só com três fornecedores e com mais verbas disponíveis, foi alterado o pedido a fusão em 180s de barras com diâmetro 70 mm por 140 mm de comprimento (3kg). Outro hipótese considerara, foi a da possibilidade de mais tarde, e caso se verificasse necessário, migrar para um sistema de cadinhos frios com o forno adquirido.

Anteriormente apenas se referiram os fabricantes que apresentaram propostas ao pedido efectuado. Três dos fabricantes ofereceram uma proposta de acordo com o que era pretendido, que foram as seguintes:

AMERITHERM – Unidade de 45 kW, com frequência entre os 10 e os 400 KHz, bobine a ser fabricada de acordo com a melhor performance após a realização de testes;

CELES – Unidade de 50 kW, com frequência variável entre os 50 – 100 KHz, bobine a ser fabricada de acordo com a melhor performance após a realização de testes;

CONSARC – Unidade de 75 kW, com frequência de 4 KHz. Bobine com cadinho frio incluído ou sem cadinho frio, preparado para 5kg de Ti.

A proposta apresentada pela CONSARC, figura 6.6, era baseada num sistema completo de fusão e vazamento de Ti, com câmara de vácuo incluída e um sistema

de vazamento assistido por centrifugação, para ajudar o enchimento. Para além do custo deste sistema ultrapassar a verba disponível, este era muito complexo e pouco flexível, o que não favorecia a aplicação do conceito pressões diferenciais inicialmente pensado de. Outra característica menos boa deste sistema, era a sua rigidez no que diz respeito à dimensão e material da carga a fundir. Esta unidade de potência é semelhante às unidades normalmente usadas na fusão de metais, e é constituída por um número fixos de condensadores, previamente ajustados a cada carga e material a fundir.

Figura 6.6 – Aspecto da câmara de fusão e vazamento do forno de indução proposto pela CONSARC [1].

As unidades apresentadas pela Ameritherm e Celes são muito idênticas no seu princípio de funcionamento, com uma unidade de potência baseada em inversores MOSFET que liga a uma unidade de condensadores. Nesta está rigidamente acoplada a bobine, que pode ser substituída por outras (figura 6.7).

Figura 6.7 - Unidade de condensadores com bobine de indução da unidade de potência.

Foram efectuadas visitas a ambos os fabricantes com o objectivo de realizar testes de fusão nas unidades propostas, para se aferir sobre a capacidade de fusão da relação massa/tempo pretendida. Foi possível constatar a grande modularidade

destes sistemas, pela possibilidade de alterar bobines e principalmente condensadores, o que permite assim ajustar mais facilmente a unidade ao tipo de carga a fundir (tamanho e material).

Nos testes realizados, conseguiu-se com ambas as unidades atingir tempos abaixo dos pretendidos para a fusão de 1,5kg de Ti em cubos (sucata de Ti utilizada nestes testes). Com a unidade da Celes conseguiu-se menor tempo na fusão, 90 s para fundir esta quantidade de metal. Em ambas as unidades foi necessário realizar vários ajustes nos condensadores e bobine para se conseguir atingir o melhor desempenho (menor tempo).

A escolha de compra recaiu sobre uma unidade de potência de 100 kW da Celes. A opção por uma unidade com o dobro da potência fica-se a dever a dois factores: a relação preço/ potência que era vantajosa, aliada ao sistema modular destas unidades. Este sistema modular deve-se às cartas de potência de 25 kW, figura 6.8.

Com a unidade de potência foram adquiridas duas bobines de indução:

- Øi 130 mm e altura 140 mm e 6 espiras em tubo de secção quadrada;
- Øi 130 mm e altura 70 mm e 6 espiras em tubo de secção quadrada.

O diâmetro interior de 130mm para tarugos de 70mm, é o espaço necessário para a introdução do tubo de quartzo, fibra protectora e cadinho (figura 6.9). Como se verificou nos testes realizados, esta distância não prejudica os tempos de fusão pretendidos. A altura das bobines permite fundir quantidades entre os 3kg (com uma barra circular de Ø70 e 140mm de altura) e cerca 200g (com uma barra circular de Ø70 e 15mm de altura) que permite encher uma turbina de Ø 65mm.

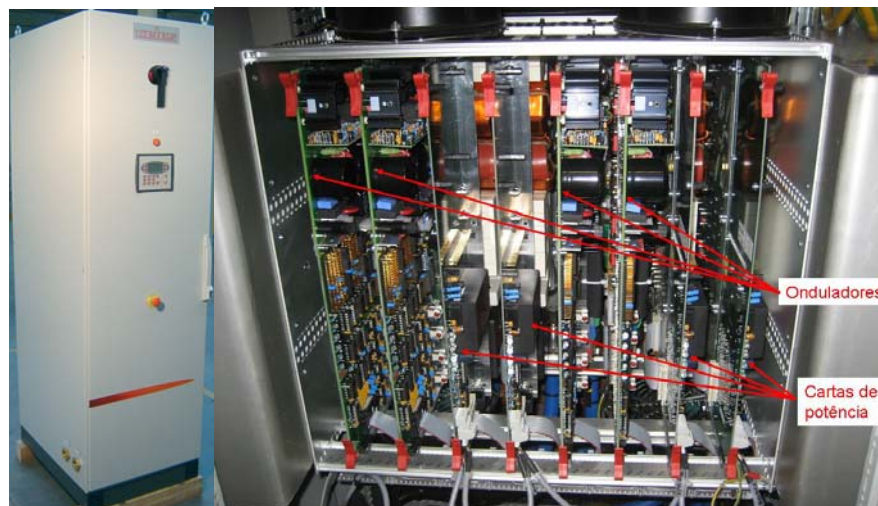



Figura 6.8 - Unidade de potência de 100kW da Celes. Cartas de potência e cartas onduladoras da unidade de potência.

Relativamente ao preço, ao aumento em 50% da potência (de 50 kW para 100kW) equivale um aumento de 25% no custo. O custo da unidade de potência de 100kW foi de cerca de 53,000€. O aumento de potência permitiu também reduzir o tempo de fusão, não em 50% porque não é uma redução linear, mas em cerca de 30%. Foram precisos 60s para fundir os mesmos 1,5kg. Foi possível fundir 250g (Ø70 por 15mm) em cerca de 20s com a bobine de menor dimensão, sem problemas de agitação do metal fundido.

Figura 6.9 - Imagem das duas bobines de indução. Vista de cima de uma das bobines com um cadinho no centro antes de um dos testes de fusão com quatro blocos de Ti.

Já no que diz respeito às cartas de potência, este sistema apresenta-se muito modular, podendo a unidade trabalhar com o número de cartas desejadas. De 1 a 4 cartas, varrendo a potência de 25 a 100kW de 25 em 25 kW. Outra vantagem que deste sistema, é a facilidade na assistência técnica. Em caso de avaria de alguma destas cartas, basta a sua remoção e envio para a Celes para reparação, podendo a unidade trabalhar com as restantes 3 cartas. Estas cartas são os elementos mais importantes da unidade, e aquelas que poderão limitar o seu funcionamento.

A unidade de condensadores tem capacidade máxima para 16 condensadores, refrigerados a água. O número de condensadores é ajustado para cada carga, dependendo do material (magnético ou não) e da quantidade.

A unidade vem equipada com uma consola fixa e uma consola portátil. Na consola é um autómato que permite definir até 10 programas de aquecimento em função do tempo, com rampas de aumento de potência. A consola portátil, ligada através de cabo à unidade, permite apenas ligar, desligar, desligar de emergência e aumentar potência através de um potenciómetro.

No sentido de controlar as perdas energéticas para a água que circula nas bobines e condensadores, e com base no catálogo da unidade de potência, [2], foi adquirido

um sensor medidor de condutividade com gama de 0 a 3999µS/cm, com uma resolução de 1 µS/cm e precisão de ± 2% na gama completa. Segundo o catálogo da unidade de potência, a máxima condutividade permitida no circuito de água de arrefecimento dos condensadores é de 300 µS/cm. O circuito de arrefecimento do forno e da unidade de condensadores será revisto com mais pormenor mais à frente neste trabalho.

6.3 – SISTEMA DE VÁCUO

Uma das operações mais importantes neste processo de fusão é a limpeza das câmaras e o estabelecimento das pressões diferenciais entre estas. Com base nos conhecimentos adquiridos, e já apresentados no ponto 5.2.2, foi elaborado um procedimento de operação para o sistema de vácuo (figura 6.10).

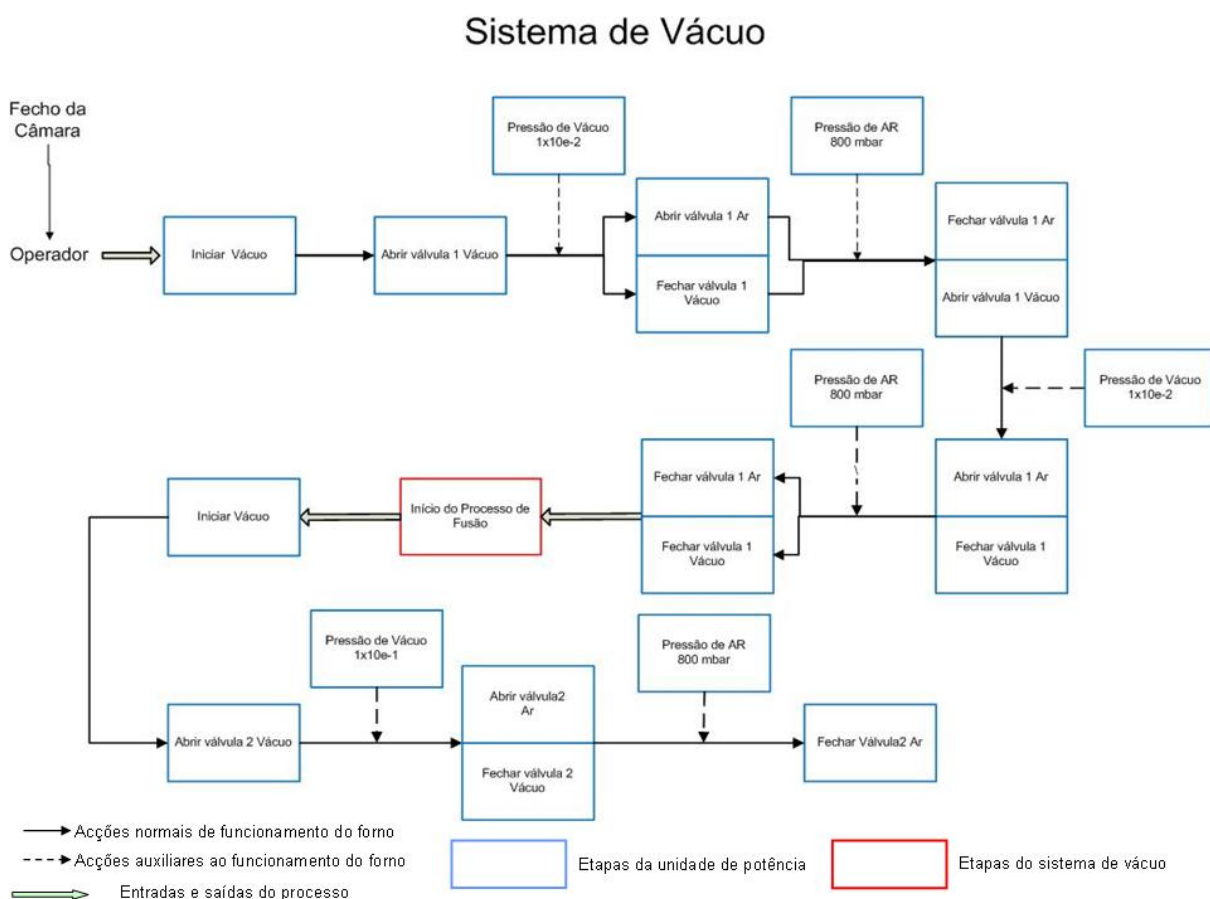



Figura 6.10 – Esquema do procedimento de vácuo. Também pode ser visto no Anexo B.

Assim foi estabelecido1x10^{-2}mbar (7.6x10^{-3}Torr), como pressão máxima a atingir no interior de ambas as câmaras para o processo de limpeza. Deverá ser atingida esta pressão em dois ciclos seguidos, o que dará a garantia de não contaminação do

metal pela atmosfera de fusão e vazamento. Para o diferencial de pressões serão testadas pressões na gama entre os 50 – 300mbar (38 – 228Torr), á imagem dos bons resultados obtidos nos testes realizados na Zollern Gmbh.

O procedimento de vácuo ficou assim definido: com o fecho da câmara da fusão e da câmara de vazamento dá-se início à realização de vácuo à câmara de fusão. O vácuo vai-se fazer sentir também na câmara de vazamento, mas a uma pressão menor, devido à falta de vedação da zona do fusível. Quando a pressão de $1x10^{-2}$mbar ($7.6x10^{-3}$Torr) é atingida, é injectado Ar (99.9999% de pureza) até uma pressão de 800mbar (608Torr), onde o ciclo é reiniciado novamente até este ponto. A pressão de 800mbar (608Torr) no interior da câmara para o inicio de fusão é um valor testado com sucesso, porém no futuro e com a realização de mais testes espera-se poder reduzir esta pressão para valores da ordem dos 200mbar (152Torr) e assim tornar o processo mais rápido e mais económico.

Com a câmara de fusão na pressão de Ar desejada, dá-se início ao um segundo ciclo de vácuo apenas à câmara de vazamento. Uma vez que o procedimento anterior ajudou na limpeza desta câmara, este ciclo vai apenas estabelecer o diferencial de pressões desejado, através de umas das técnicas explicadas no inicio deste capítulo.

Por recomendação e por experiência, está prevista a limpeza da câmara, completamente vazia, com a máxima pressão possível de atingir com o sistema de bombagem. Este procedimento visa limpar o interior da câmara e as zonas mais difíceis de partículas mais pequenas e será efectuado uma vez por dia. Este procedimento foi verificado como tendo um efeito benéfico na performance destes sistemas, se realizado uma a duas vezes durante o normal processo de fusão.

O procedimento tal como está pensado, tem provas dadas de sucesso noutros sistemas já testados. Porém podem ser necessárias a realização de alterações ao sistema desenvolvido.

Para a implementação do sistema de vácuo de modo a operar mediante o procedimento de fusão apresentado, e segundo as necessidades identificadas, foi elaborada uma de componentes básicos necessários, que é apresentada a seguir:

- Sistema de bombagem;
- Sensores;
- Electroválvulas;

- o Filtros;
- o Vários acessórios de ligação.

Na aquisição dos componentes para o sistema de vácuo, foram contactados alguns fornecedores de vácuo, dos quais se destacam: ALCATEL (França); LEYBOLD (Alemanha) e EDWARDS (USA). Estes foram os fornecedores que apresentaram as propostas mais coerentes e fundamentadas para o fornecimento do material pretendido. Destes três, a escolha recaiu sobre a ALCATEL, representada em Portugal pela STV, Lda, empresa com a qual estava já criada uma relação de confiança na prestação de serviços.

Assim o dimensionamento do sistema de bombagem foi efectuado de acordo com o cumprimento da métrica nº 4 – tempo total de fusão e vazamento, entre 180 – 600seg. Depois de conhecido o tempo máximo necessário para a fusão da quantidade máxima de metal, foi estabelecido o tempo máximo que o ciclo duplo de limpeza às câmaras deveria ter, de modo a cumprir os intervalos de tempo pretendidos para esta métrica. Deste modo foi estabelecido que o sistema de bombagem deveria realizar os dois ciclos de limpeza para o volume máximo das câmaras (aproximadamente 35litros ($0.035m^2$)) duas vezes em 30seg, atingindo a pressão máxima de $1x10^{-2}$mbar ($7.6x10^{-3}$Torr).

Com o dimensionamento das características do sistema de bombagem, foram também definidos os restantes elementos do sistema de vácuo, que ficou como pode ser visto na figura 6.11.

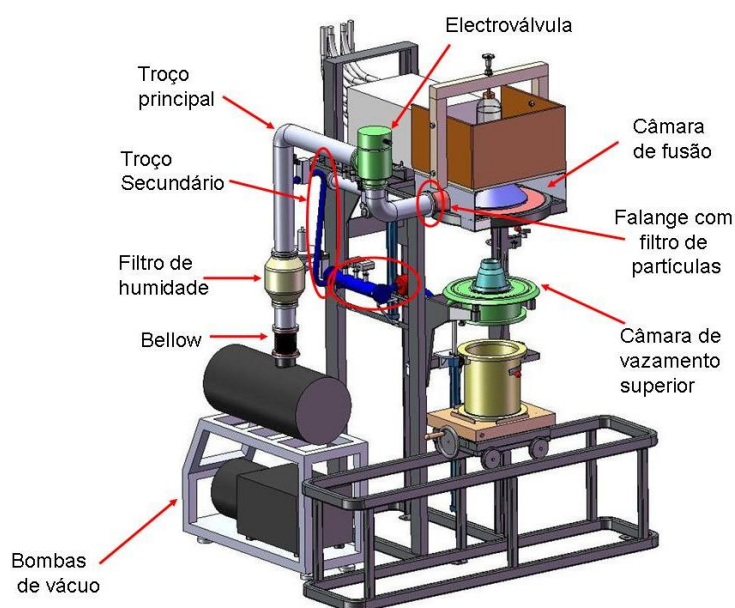



Figura 6.11 – Aspecto do sistema de vácuo, e interligação com o forno de fusão e vazamento.

Assim, este sistema é constituído por dois troços de tubagem: o troço principal, que liga directamente o sistema de bombagem à câmara de fusão através de uma tubagem tipo DN100. A este troço, está ligado um segundo, secundário, com tubagem DN 25 e que liga à câmara de vazamento superior.

Na tubagem principal é utilizado um “bellow” para evitar a transmissão da vibração resultante do normal trabalhar das bombas, para a estrutura principal do forno. A este elemento segue-se um filtro de humidade, constituído por esferas de alumina activada, que serve para evitar a entrada de humidade no interior das bombas. Antes da entrada na câmara e fusão existe uma electroválvula tipo on/off DN 100, e montado entre a falange deste troço e a falange do troço de admissão da câmara de fusão, está um filtro de partículas >25µm próprio de sistemas de vácuo.

Este filtro pode ser muito fino e obrigar a sistemáticas operações de limpeza. No caso de se verificar esta situação, está prevista sua substituição por um filtro maior, do tipo do que é mostrado na figura 6.12. O filtro escolhido, utilizado na admissão de ar em camiões e máquinas agrícolas, permite reter cargas de pó pequenas, aliado a baixas perdas de carga.

Figura 6.12 – Filtro de papel, para máquinas agrícolas e camiões marca Mann+Hummel [5].

As dúvidas operacionais relativamente á utilização do primeiro filtro, surgem devido à natureza da aplicação e dos materiais envolvidos, nomeadamente carapaças e moldações cerâmicas que normalmente soltam grandes quantidades de partículas.

No troço principal entre a electroválvula e a entrada na câmara de fusão, existe um tubo DN 70, onde estão colocados dois sensores de vácuo, um tipo piezo - eléctrico até, um pirani $1x10e^{-4}$ mbar ($7.6x10^{-5}$ Torr), a admissão de Ar e uma válvula de para entrada de ar na câmara para restabelecer o equilíbrio com a pressão atmosférica (chamada “venting”) figura 6.13.

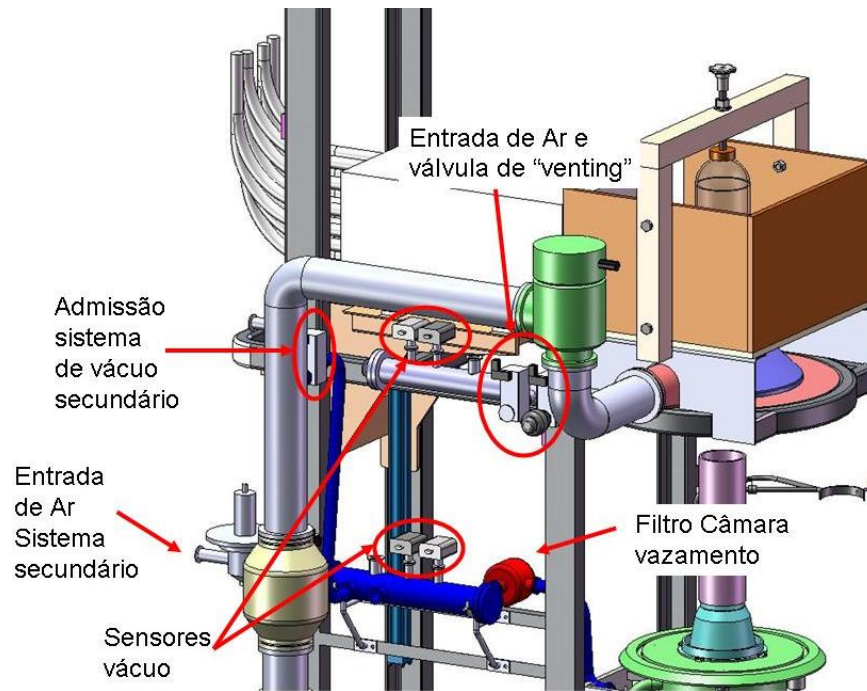



Figura 6.13 – Aspecto geral dos dois tubos DN 70 dos troços primário e secundário. Nestes tubos são colocados os sensores de vácuo, e electroválvulas.

O troço secundário de vácuo utiliza tubo flexível DN25 em aço inox para, a ligação entre o troço principal e o tubo rígido DN70, fixo à estrutura principal do forno, e entre este e a câmara vazamento superior. Esta ligação é feita na zona posterior da câmara de vazamento superior, figura 6.14. A escolha da tubagem DN25 deve-se ao facto da utilização deste troço ser principalmente para estabelecer o diferencial de pressões entre as câmaras.

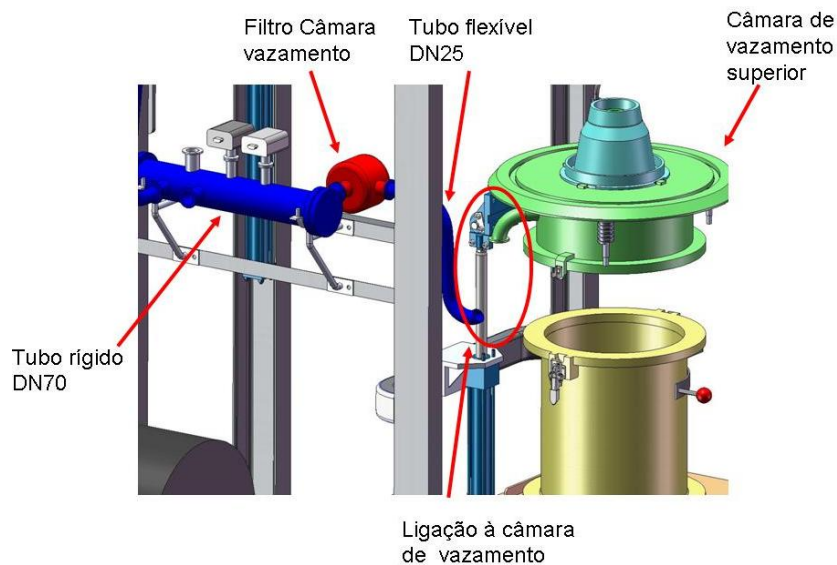



Figura 6.14 – Ligação do troço de vácuo secundário à câmara de vazamento superior (tubo azul escuro curvo com o tubo verde curvo da câmara).

As dúvidas operacionais relativamente á utilização do primeiro filtro, surgem devido à natureza da aplicação e dos materiais envolvidos, nomeadamente carapaças e moldações cerâmicas que normalmente soltam grandes quantidades de partículas.

Foram adoptados acessórios de ligação rápida tipo ISO KF, figura 6.15, para a ligação de componentes ou instrumentos de carácter não permanente, como os sensores ou electro-válvulas DN25 p.e. E acessórios tipo ISO K de 4 parafusos para as ligações consideradas permanentes, p.e ligação entre falanges DN 100 no troço primário, (figura 6.16). Em ambos os tubos foram colocadas acessórios rápidos tipo KF DN25 suplentes, e foi ainda deixado mais espaço físico para a colocação futura deste tipo de acessório caso se verifique essa necessidade.

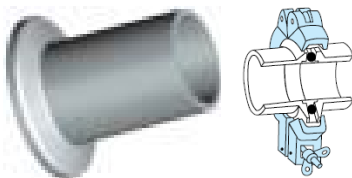



Figura 6.15 – Tubo para ligação do acessórios rápidos tipo KF e acessório de ligação rápida tipo KF.

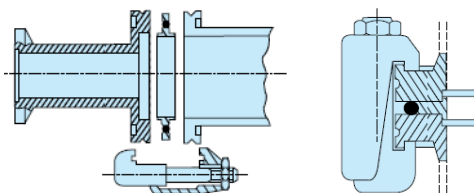



Figura 6.16 – Acessório de ligação tipo K.

No que diz respeito ao sistema de bombagem, as propostas recebidas apresentavam soluções semelhantes baseadas num sistema constituído por uma bomba rotativa seca tipo “roots” e uma bomba rotativa líquida primária, montadas numa estrutura metálica própria.

O conjunto adquirido foi dimensionado pela STV e apresenta as seguintes características: pressão máxima nominal de $2x10e^{-4}$ mbar ($1.5x10e^{-5}$ Torr) com um caudal máximo nominal de 600 m^3/h (figura 6.17 e 6.18). Outra característica importante deste sistema prende-se com o filtro no escape das bombas. Estes gases são extremamente tóxicos. As bombas escolhidas estão sobredimensionadas para o volume das câmaras e para sistema de tubagens projectados, este facto deve-se à obrigatoriedade na utilização de filtros de partículas que vai introduzir perdas de carga no escoamento.

Figura 6.17 – Aspecto do sistema de bombagem ALCATEL adquirido.

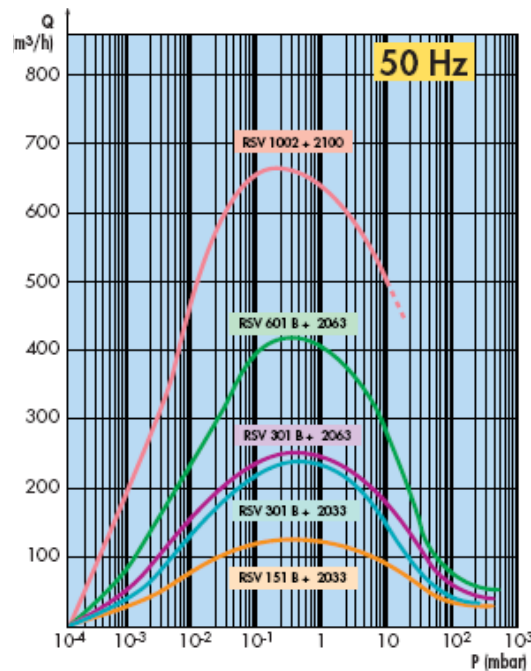



Figura 6. 18 – Curva característica do conjunto. Conjunto RSV 601B + 2063 – linha a verde.

Os sensores de vácuo (piezo- eléctrico e pirani) foram adquiridos inseridos num kit, juntamente com um controlador figura 6.19. Este conjunto apresenta as seguintes vantagens relativamente à compra dos elementos em separado:

- Combina os dois sensores de modo a permitir efectuar a medição de vácuo em contínuo, na gama entre os 1400 mbar e os $1x10e^{-4}$ mbar (1000 Torr – $1x10e^{-4}$ Torr), dada pelos sensores;
- Dispõe de dois relés, que permitem o ajuste de dois setpoints e controlo dos respectivos sinais de saída em tensão;
- Permite a leitura e aquisição de dados para um software, p.e. Labview.

Figura 6.19 – Controlador, pirani e piezo que constituem o Kit adquirido para a medição de vácuo.

Devido à sensibilidade deste tipo de sensores, principalmente os piranis e apesar de ambos os sensores terem a capacidade para suportar uma sobre pressão de 4 bar absoluto, um dos sinais do controlador vai ser utilizado para segurança dos próprios sensores. Em caso de ser detectado pelo piezo - electrico uma sobre pressão no sistema, a válvula de “venting” abre para estabelecer o equilíbrio de pressões com o exterior.

O outro sinal disponível vai ser utilizado para controlo do sistema de vácuo. A localização destes sistemas teve em conta a maior proximidade possível do volume a medir, e a distância suficiente para serem mantidos fora do alcance do campo magnético da bobine. Foram adquiridos dois conjuntos destes, para leitura, aquisição e controlo do vácuo na câmara de fusão e de vazamento independentemente.

No que diz respeito às electro-válvulas, estas foram adquiridas com a dimensão de acordo com a tubagem onde iam ser inseridas (DN25 ou DN100), e são do tipo em linha, ou seja a entrada e a saída da válvula estão alinhadas em planos paralelos. Foram adquiridas 3 válvulas DN 25: duas para a admissão de Ar e uma para a ligação do troço secundário ao troço primário. Foi também adquirida uma válvula de “venting” DN16. Todas as válvulas são de pistão do tipo on/off, de actuação electro – pneumáticas. A pressão de ar da rede pneumática é utilizada para manter o pistão interno contra a sede, mantendo a válvula fechada, que é aberta através de um sinal eléctrico num solenoide.

Ainda no que diz respeito ao sistema de vácuo, e mais particularmente à injecção de Ar, este vai se ser fornecido a partir de garrafas, e vai ser feita a leitura da pressão à entrada do sistema, de modo a poder controlar este processo. A regulação da pressão de Ar vai ser realizada nas próprias garrafas (caso estas estejam junto ao equipamento), ou em alternativa poderá ser adquirida uma reguladora de pressão, para a entrada de Ar no sistema.

Tabela 6.1 – Materiais utilizados no sistema de vácuo

Componente	Material
tubagem principal	aço inox 304
tubos DN 70	aço inox
tubos flexíveis DN25	aço inox 316
válvulas DN25	alumínio
válvula DN100	aço inox

6.4 – Soluções de construção dos vários elementos

Uma das características mais evidente e que é comum em quase todos os sistemas de fusão industriais, é a robustez estrutural que os todos os elementos apresentam. Aparentemente, todos os sistemas estão sobredimensionados no que diz respeito a esta característica, muito devido à própria natureza da aplicação, indústria pesada, mesmo sendo de precisão.

Do ponto de vista de construção, este projecto encontra-se dividido em:

1. Estrutura principal de suporte;
2. Câmaras de vazamento: câmara de fusão e câmara de vazamento;
3. Falange do cadinho;
4. Sistemas de accionamento e elevação: sistema da câmara de vazamento, sistema da unidade de condensadores e Carro de transporte e elevação da câmara de vazamento;
5. Sistema de fixação do quartzo à estrutura;

Todos os elementos do forno de fusão e vazamento foram modelados no software de modelação 3D “SolidWorks”, tendo alguns dos elementos deste equipamento sido submetidos a simulação estrutural estática no software “CosmosWorks”, integrado no anterior. A validade dos resultados obtidos nas simulações depende da capacidade de análise e interpretação do problema real. A obtenção de resultados próximos dos reais obriga a um processo iterativo com início em modelos simples e aumentando a dificuldade até à simulação o mais próximo possível do problema real. Nas simulações que foram possíveis realizar no âmbito deste projecto, foram

utilizados modelos e condições simplificadas das reais, mesmo assim os resultados obtidos permitiram a identificação e correcção de eventuais pontos frágeis ou de possível falha dos vários elementos. Assim, foram efectuadas simulações estruturais nos seguintes elementos:

- o Estrutura de suporte da câmara de vazamento superior;
- o Estrutura de suporte da unidade de condensadores;

Foram também realizadas simulações ao efeito da temperatura nos seguintes elementos:

- o Câmara de fusão;
- o Câmara de vazamento superior;
- o Câmara de vazamento inferior.

As ferramentas de simulação estrutural são de extrema utilidade na avaliação da viabilidade das soluções geradas, contudo é sempre preciso ter uma análise cuidada das condições fronteira adoptadas e uma visão crítica sobre os resultados obtidos. Se isto for feito, os resultados podem ser uma boa base de partida para trabalhos de simulação mais elaborados e resultados mais próximos da realidade da aplicação.

Outro aspecto a ter é conta é que em todos os processos de desenvolvimento de novos produtos, o produto final não é resultado apenas do trabalho de projecto, mas da combinação deste com o processo ou processos de fabrico adoptados, e das suas limitações. Assim, este relatório abrange apenas o resultado do trabalho de desenvolvimento do conceito e projecto mecânico. O produto final vai ainda certamente sofrer alterações impostas pelo processo de fabrico, ou por novas soluções que durante esta fase possam surgir.

A construção deste equipamento foi entregue a empresa M.J.Amaral, Lda (de Vale de Cambra), com quem o INEGI e Zollern mantêm uma relação comercial de confiança. A M.J.Amaral é responsável pela aquisição de toda a matéria-prima e componentes necessários. A montagem do equipamento e integração com o istsema de vácuo decorrerá nas instalações do INEGI e será executado pela M.J.Amaral com a supervisão do INEGI. As listas de componentes a adquirir e de material utilizado pela M.J. Amaral podem ser visto nas tabelas 6.2 e 6.3, respectivamente.

Tabela 6.2 – Lista de componentes

Componentes	Marca	Função
Grampos de aperto	Ganter	Aperto das câmaras de vazamento
Filtro	Mann + Hummel	Troço secundário de vácuo
Molas	Supra	Apoio da câmara de vazamento superior
Molas	Supra	Sistema de eliminação de folgas
Central hidráulica	Hidromac	Alimentação aos cilindros
Acessórios de hidráulica	Hidromac	Válvulas reguladores de caudal e pressão
Cilindros hidráulicos	Hidromac	Elevar unidade de condensadores e elevar câmara de vazamento superior

Tabela 6.3 – Lista de material

Componentes	Material
câmara de fusão	aço inox 304
câmaras de vazamento	aço inox 304
falange do cadinho	aço inox 304
elemento para colocação do fusível	Aço inox 304 (Titânio)
estrutura	tubo rectangular 60 x 40 x 3mm
estrutura	perfis UPE 100 e UPE 80
estrutura suporte da câmara de vazamento superior	aço de construção
estrutura suporte dos condensadores	aço de construção
Tampo do carro	aço inox 304
2 conjunto de barras paralelas	aço de construção
estrutura do carro	tubo rectangular 60 x 40 x 3mm

6.4.1- ESTRUTURA PRINCIPAL DE SUPORTE;

A estrutura principal de suporte do forno foi projectada em tubo rectangular de 60x40mm, com 3mm de espessura, e para ser executada por construção soldada. A estrutura é constituída por três partes distintas com os seguintes nomes: corpo, frente, e painel de controlo, figura 6.20.

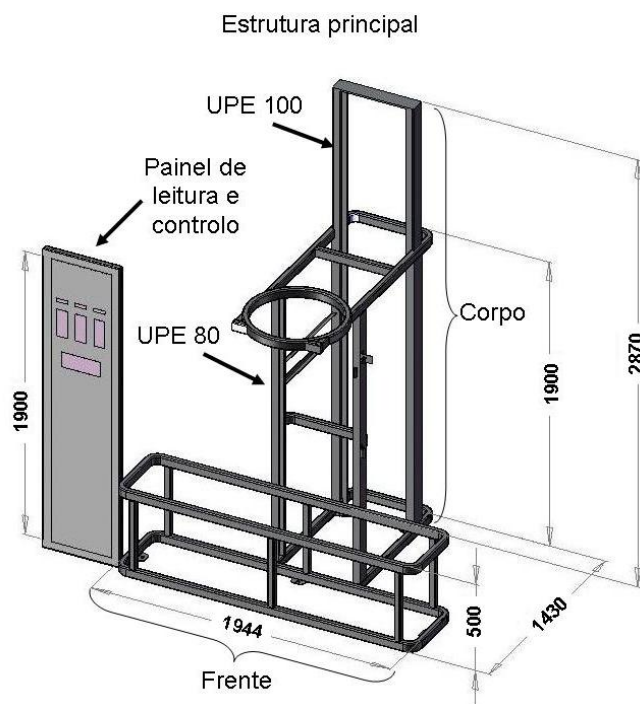



Figura 6. 20 – Estrutura do forno de fusão e vazamento.

Corpo: situado na parte posterior da estrutura, está posicionada em altura. É constituída no plano superior por uma parte circular frontal onde assenta a câmara de fusão e uma parte rectangular atrás desta, onde ligam dois perfis UPE 80 e dois perfis UPE 100 paralelos. Os perfis UPE (figura 6.21) são responsáveis pela ligação do corpo à base da estrutura.

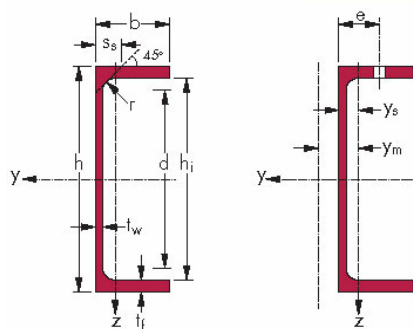



Figura 6.21 – Características gerais dos perfis europeus UPE [6].

No corpo, figura 6.22, estão colocados apoios para: fixação dos cilindros hidráulicos, tubo DN70 do sistema de vácuo secundário e estrutura de fixação do quartzo (os dois cantos na frente do corpo).

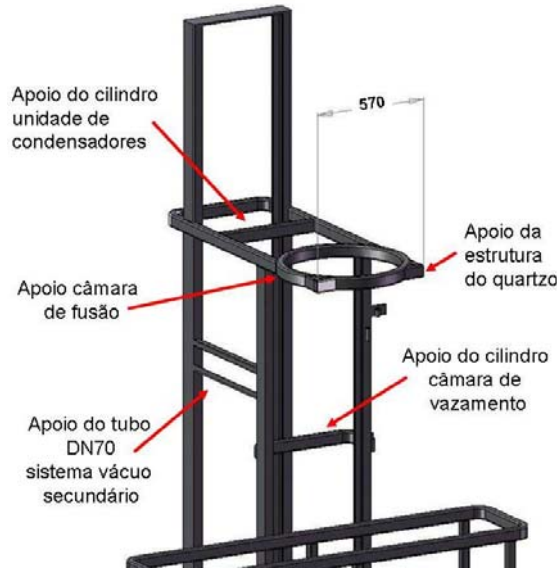



Figura 6.22 – Pormenor do corpo da estrutura principal.

Frente: é constituído por duas estruturas rectangulares em dois planos paralelos ligadas por seis barras verticais. Esta estrutura faz o curso onde o carro que sustenta a câmara inferior de vazamento se desloca.

Painel de controlo: localizado mais à esquerda na estrutura, é uma moldura vertical revestida por uma chapa de aço onde vão ser fixos os mostradores, leds de aviso e alguns dos controlos do forno. Os controladores vão ser colocados a uma altura entre os 1600 -1700mm para permitirem fácil visualização durante a operação do forno.

A estrutura tem 8 pontos de fixação ao chão, estando 6 distribuídos na frente e dois na parte posterior do corpo, figura 6.23.

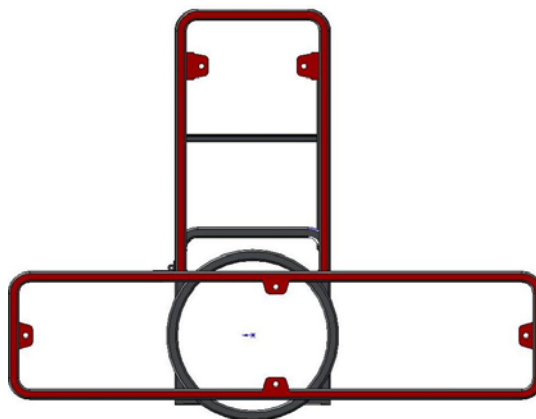



Figura 6.23 – Base da estrutura principal (a vermelho), com os pontos de fixação ao chão.

6.4.2 - CÂMARAS DE VAZAMENTO: CÂMARA DE FUSÃO E CÂMARA DE VAZAMENTO

Para a construção das câmaras de fusão e vazamento, foi adoptado como material de construção, o aço inoxidável 304. Este aço combina boas propriedades mecânicas com características úteis em aplicações de indução, como o facto de ser não magnético devido à sua estrutura austenitica.

Como foi visto, foram projectadas quatro câmaras: câmara de fusão, câmara de vazamento superior e duas câmaras de vazamento inferiores. Estas últimas podem ser alternadas mediante a dimensão da moldação a vazar.

De um modo geral, os esforços presentes nesta aplicação são baixos. Contudo, alguns elementos estão sujeitos a esforços na presença de altas temperaturas, o que pode contribuir para a falha em caso de mau dimensionamento. Neste sentido, a espessura das falanges das câmaras foram sobredimensionadas de modo a diminuir o efeito da temperatura nas características estruturais destes elementos e assim garantir um aumento do tempo de vida destes.

6.4.2.1 – Câmara de fusão

A câmara de fusão, figura 6.24, é um dos principais elementos deste equipamento, e é um dos que está mais exposto às elevadas temperaturas atingidas durante a fusão. Este elemento, está rigidamente fixo à estrutura principal e ligado ao troço principal de vácuo através de uma ligação não permanente.

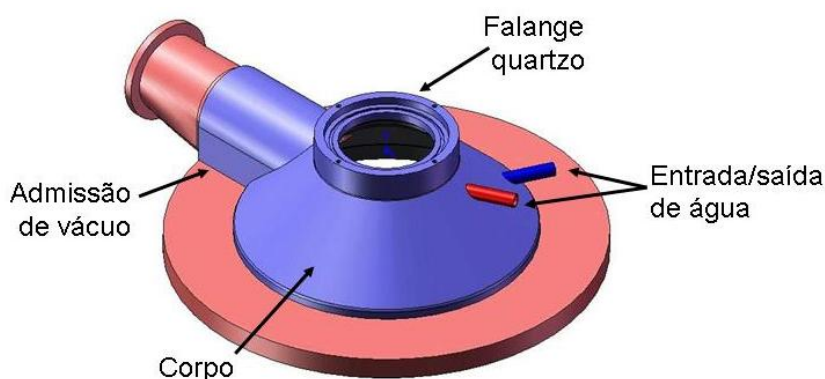



Figura 6.24 – Aspecto geral da câmara de fusão.

A sua forma cónica resulta de uma aproximação a um fundo “copado”, com a vantagem sobre este, de ter menos área superficial exposta ao campo magnético gerado na bobine. Após a falange de assentamento do quartzo, as paredes crescem em direcção oposta ao campo magnético.

A azul estão as zonas refrigeradas da câmara que incluem: o corpo, a falange de assentamento do quartzo e parte da tubagem de ligação ao sistema de vácuo. Estes elementos estão projectados com parede dupla, para permitir a circulação de água de refrigeração. As paredes interiores e exteriores têm 3mm de espessura, valor suficiente para resistirem à pressão da água de refrigeração no interior e permitirem ao mesmo tempo a transferência de calor suficiente para o arrefecimento imediato em caso de contacto com metal fundido (segundo cálculos efectuados è pressão interna máxima admitida para a água 7bar e à transferência de calor). Esta espessura de parede foi escolhida também a pensar no processo construtivo e de acordo com o construtor. Permitir levar este elemento ao torno de modo a conseguir a concentricidade entre as falanges superior e inferior.

Outros requisitos presentes no projecto deste elemento foram a diminuição ao mínimo possível do seu volume interior, e a eliminação de cantos interiores, prejudiciais para o vácuo. A altura desta câmara é suficiente para a ligação da tubagem DN100 de vácuo, como se pode ver na figuras 6.25 e 6.26.

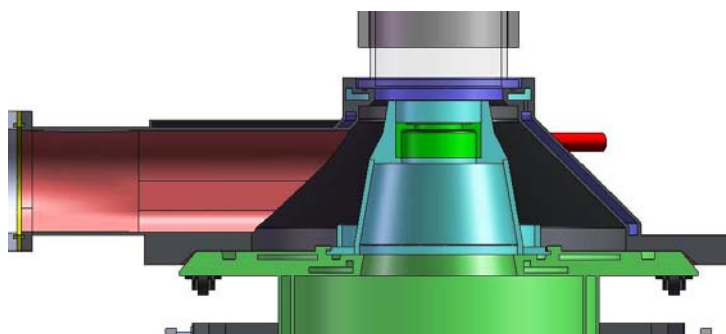



Figura 6.25 – Vista em corte da câmara de fusão, fechada com a câmara de vazamento superior.

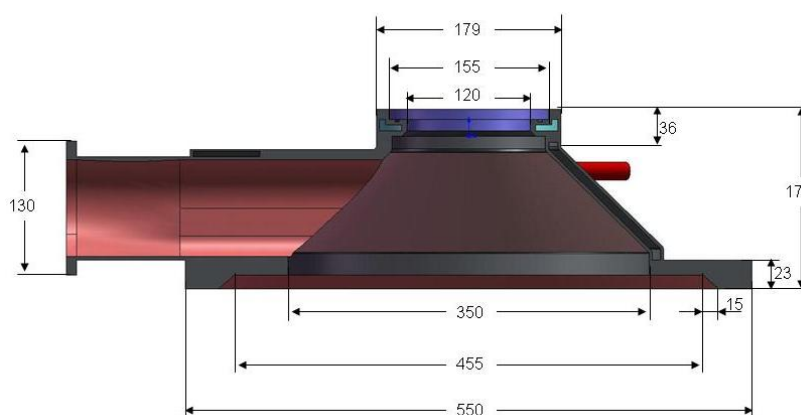



Figura 6.26 – Pormenor da falange inferior da câmara de vazamento e cotas gerais da câmara de fusão.

Na falange inferior desta câmara está projectado um chanfro, de 15mm de largo, de modo a permitir a correcção do encosto com falange da câmara de vazamento superior. O peso desta câmara é de cerca de 35kg.

A falange do topo, onde o quartzo assenta, é também refrigerada de modo a conservar o o’ring de vedação. As faces, interior e superior, desta falange estão directamente expostas à radiação proveniente do cadinho e como tal foi decidido aumentar estas paredes para 5mm de espessura. Apesar de estar previsto revestir o cadinho com uma fibra, foi considerada a pior situação de operação, que seria sem qualquer protecção, considerando apenas radiação e sem qualquer convecção no interior. Tipo um meio em vácuo ou a queda de metal fundido directamente nesta zona. O diâmetro da zona onde assenta o quartzo tem 155mm, cota definida com tolerância suficiente para as falanges do quartzo que têm 150mm + 3 a 4mm.

No que diz respeito ao sistema de refrigeração, a entrada e saída de água é feita por dois tubos de 15mm diâmetro colocados na parte posterior da câmara, a azul e vermelho, respectivamente na figura 6.27.

Foi criado um circuito no interior da câmara (setas a azul), que abrange também a falange do quartzo, de modo a garantir a homogeneização do arrefecimento da câmara. Assim e como pode ser visto na figura 6.27. A entrada da água é feita numa cota inferior da câmara, é obrigada a passar pelo tubo de ligação ao sistema de vácuo e a entrar na falange do quartzo. A saída é junto à entrada, numa cota superior. Na falange do quartzo, e seguindo o mesmo método adoptado para o corpo, a entrada e a saída são feitas em lados opostos. De modo a garantir que a água atinge toda a área da falange, a furacão é mais pequena junto à entrada e maior na zona de ligação ao sistema de vácuo para a entrada de água na falange. A área de passagem da água no tubo que liga ao sistema de vácuo é inferior à somada das áreas destes furos de passagem da água de modo a garantir a passagem da água para a falange. Para a saída, os furos foram posicionados a partir do último quarto da câmara até á zona da saída da água, figura 6.27.

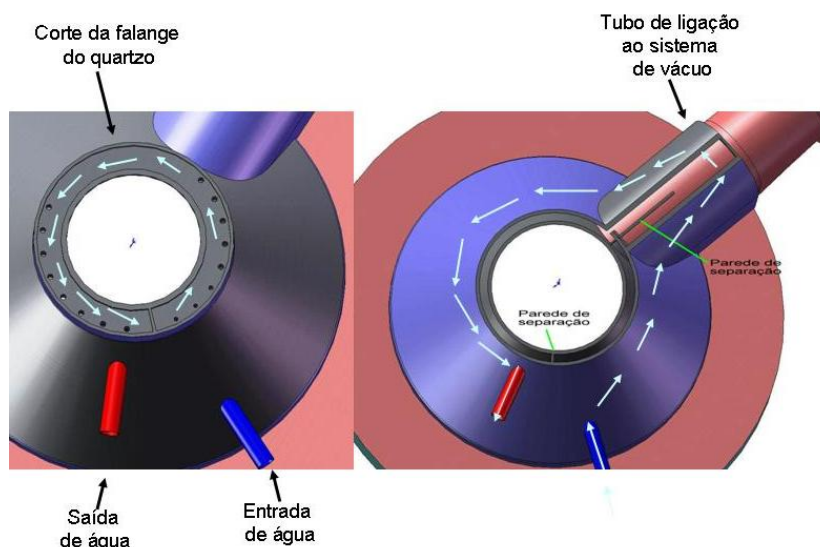



Figura 6.27 – Circuito interno de refrigeração da câmara de fusão. Pormenor visto de cima, do circuito de arrefecimento na falange de assentamento quartzo.

6.4.2.2 – Câmara de vazamento

As dimensões das câmaras de vazamento figura 6.28, estão directamente relacionadas com as dimensões das moldações a vazar. Deste modo o diâmetro interno das câmaras é de 270mm, ou seja o diâmetro da moldação maior, mais 10mm por banda para a introdução de fibra para conservação do calor desta. As paredes do corpo da câmara são de 3mm de espessura.

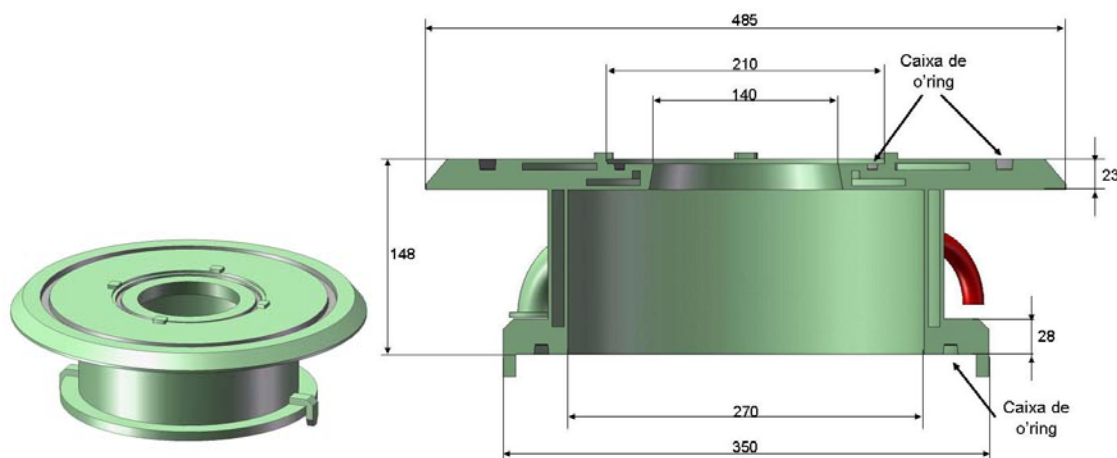



Figura 6.28 – Aspecto geral da câmara de vazamento superior.

O conceito de uma câmara partida, deve-se á necessidade de ter um elemento fixo para ligação de vácuo, e do circuito de refrigeração, evitando assim operações de ligar e desligar mangueiras e cabos em cada procedimento de fusão. Assim e como já foi referido, a câmara de vazamento foi dividida numa parte superior fixa e numa parte inferior amovível mediante a moldação a vazar.

A câmara de vazamento superior é o elemento de vedação entre câmaras. A vedação com a câmara de fusão e a vedação com as câmaras de vazamento inferiores é feita através de o'rings localizados nas falanges superioras e inferior desta câmara, respectivamente. Foram adoptados o'rings de secção circular, com as caixas projectadas justas às dimensões do o'ring de modo a criar alguma pressão para os fixar.

A falange superior deste elemento tem a forma negativa da falange inferior da câmara de fusão (figura 6.29). No centro desta falange é montada a falange do cadinho, fixa através de um sistema de baioneta em quatro pontos. A vedação entre estes dois elementos é feita através de um o'ring na face onde a falange do cadinho assenta. O sistema de baioneta está projectado para criar uma ligeira pressão no o'ring, entre este elemento e a face da falange da câmara onde assenta.

Na face inferior desta falange, estão roscados 3 varões M12 com a ponta oposta roscada em M10, e que servem de guia às molas onde esta câmara assenta. São também responsáveis pela fixação desta câmara, à estrutura que a suporta, figura 6.29. Este conjunto vai ser visto com mais detalhe nos sistemas de accionamento.

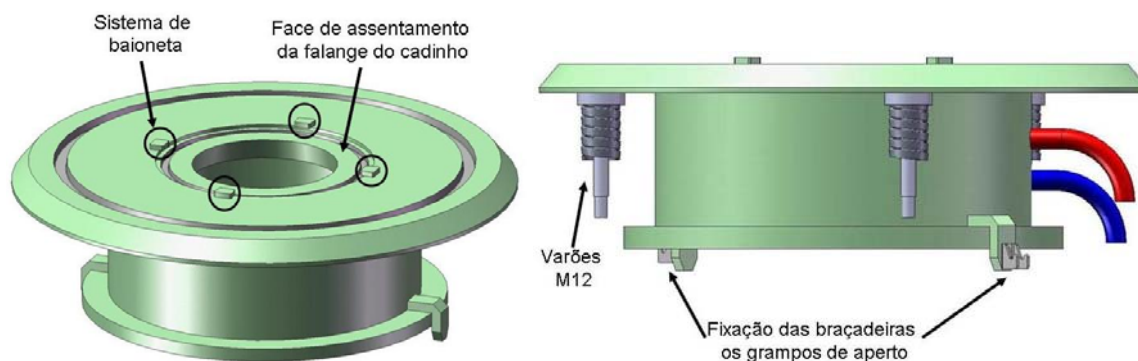



Figura 6.29 – Aspecto do sistema de fixação da câmara de vazamento superior na estrutura de elevação, e do sistema de baioneta.

Na falange inferior desta câmara estão colocadas dois elementos em forma de L invertido, para fixação das duas braçadeiras onde os grampos da câmara de vazamento inferior vão apertar. Na falange superior da câmara de vazamento existem outros dois apoios para fixação destes grampos, como pode ser visto na figura 6.30. Estes grampos têm a capacidade para 3200N, são em aço inox e permitem um ajuste da extensão de aperto de 25 + 9mm. Na figura 6.30 pode ser visto um pormenor dos grampos escolhidos, e do sistema de encaixe entre as duas câmaras para as alinhar.

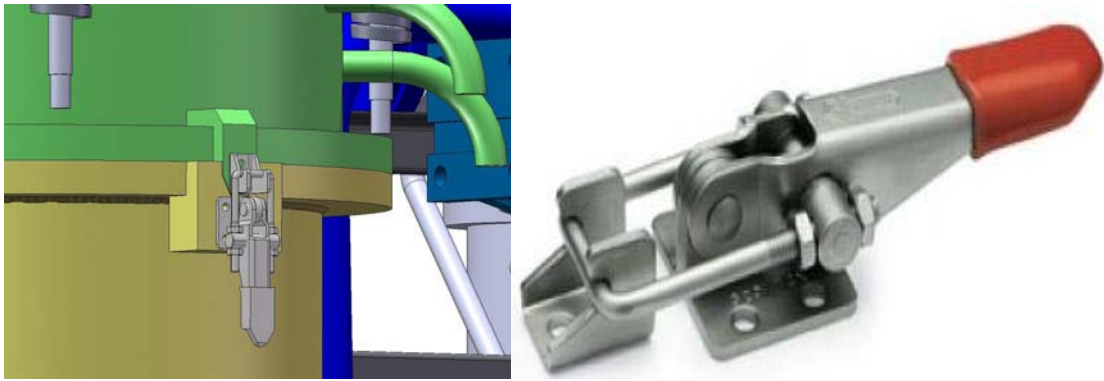



Figura 6.30 – Pormenor dos grampos de aperto da câmara de vazamento e do sistema de centragem.

A câmara de vazamento superior é refrigerada na falange superior e corpo, como se pode ver na figura 6.31. Na falange superior, foi projectado um sistema que arrefece a face superior, que fica exposta a eventuais quedas de metais, e face onde está o o'ring de vedação com a falange do cadinho. À imagem do que foi feito para a câmara de fusão, a entrada de água é feita no corpo numa cota inferir à saída. Como o corpo está dividido, obrigando a água a passar para a falange pelos orifícios oblongos, e para a face de encosto do o'ring pelos furos redondos. Na falange existe uma separação da entrada com a saída que coincide com a mesma separação que existe no corpo entre a entrada e saída

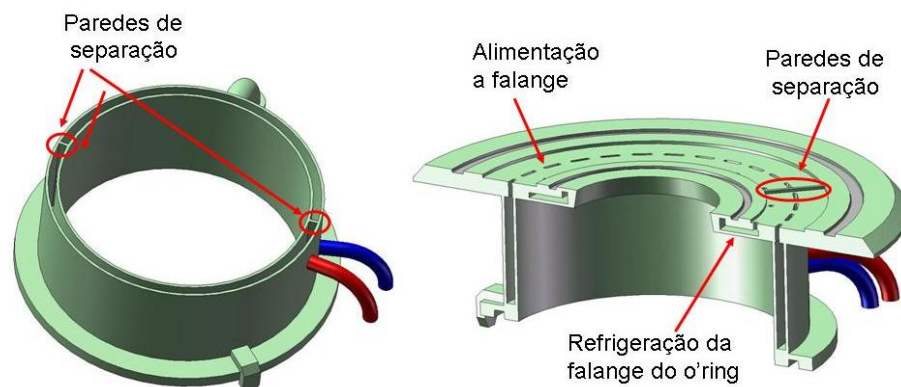



Figura 6.31 – Corte da câmara de vazamento superior. Circuito de arrefecimento do corpo e falange.

Foram realizadas simulações a este elemento de modo a prever o efeito combinado das forças actuantes e da temperatura. Foram considerados como forças actuantes (a violeta na figura 6.32), as molas a actuar na face inferior da falange superior, o peso próprio e o peso da câmara de vazamento inferior. A falange superior foi considerada fixa. A temperatura assumida nas paredes internas da câmara foi de 1473 ºK (1200ºC), temperatura da moldação. Nas primeiras tentativas não foi considerado o efeito da refrigeração. Nestas condições, os resultados das deformações e dos pontos acima da tensão limite elástica podem ser vistos na figura 6.32 ou no anexo C.

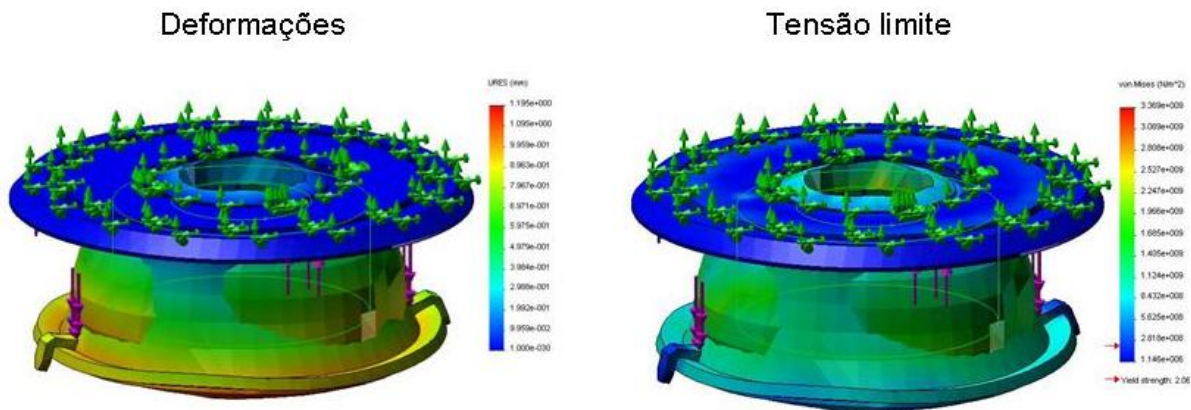



Figura 6.32 - Deformações provocadas pelo efeito da temperatura assyuociado às forças aplicadas à câmara de vazamento superior.

As duas câmaras de vazamentos inferiores que estão inicialmente previstas seguem ambas o mesmo conceito, um cilindro com uma falange aberta no topo e uma falange fechada na base (figura 6.33). A câmara maior pesa cerca de 28kg enquanto a mais pequena pesa cerca de 23kg. Em ambas as câmaras o corpo é de parede simples de 5mm de espessura, que lhe dá a rigidez suficiente para aguentar os esforços e temperaturas associadas.

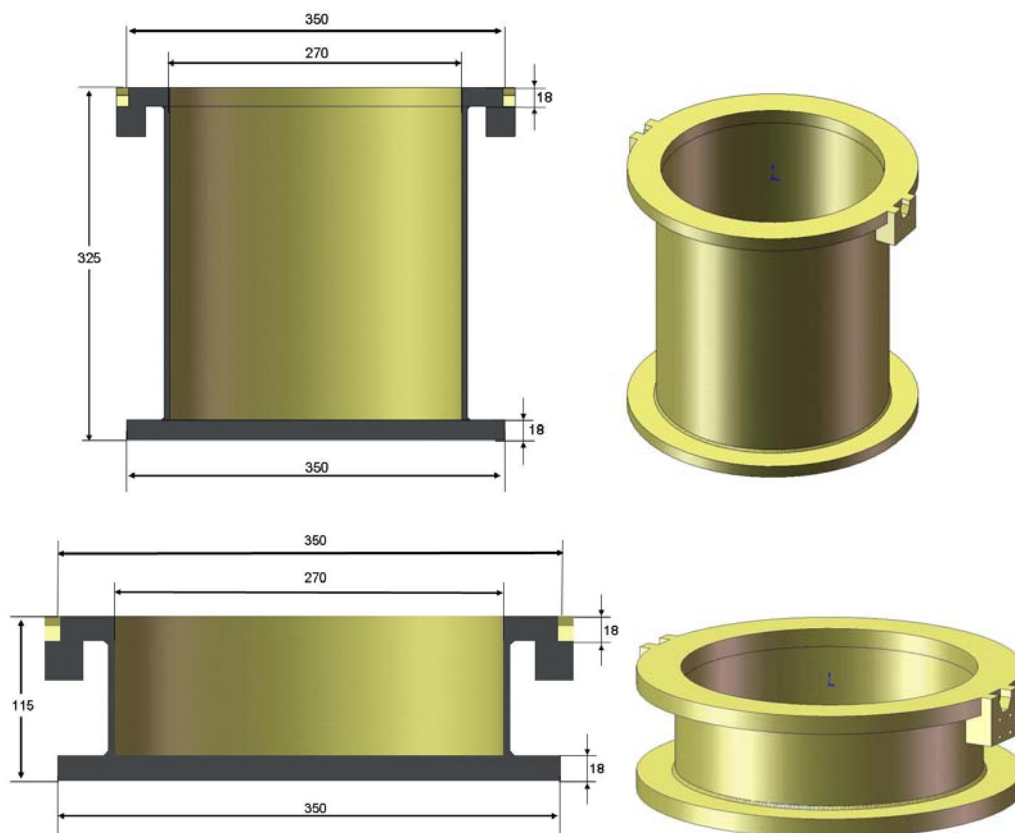



Figura 6.33 – Câmaras de vazamento inferiores: grande e pequena.

Neste sentido foram realizadas simulações à câmara maior, onde foi considerada a temperatura de 1473 ºK (1200 ºC) nas paredes do corpo e na base, e o peso de uma

carapaça cheia (com cerca de 20kg), mais o peso próprio da câmara. A falange superior foi considerada fixa. Os resultados apresentam como zonas mais frágeis a base, e a junção desta com o corpo, figura 6.34, como aliás era previsto.

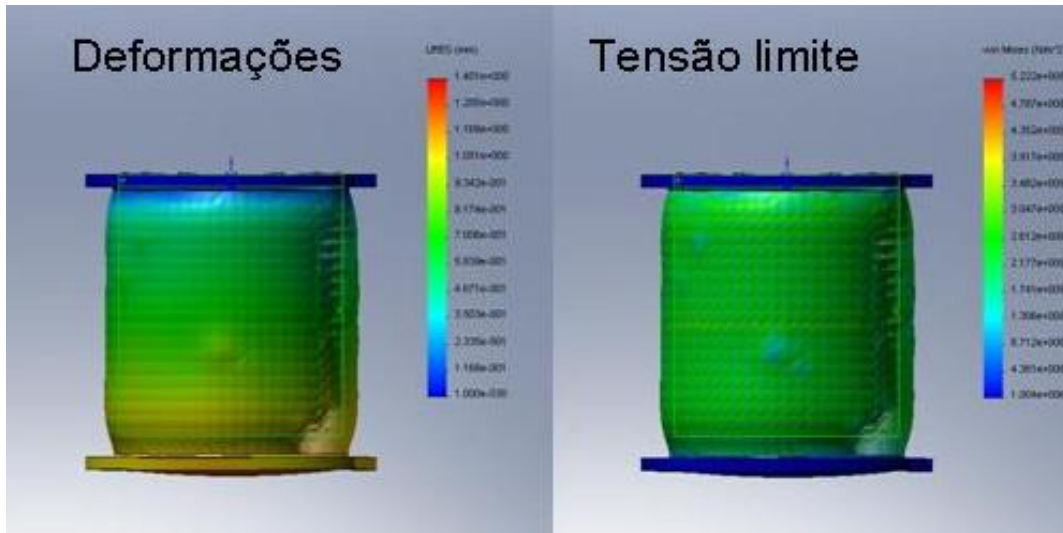



Figura 6.34 – Previsão das deformações provocadas pelo efeito da temperatura associado ao peso próprio e ao peso da carapaça.

Contudo estas são condições muito adversas, uma vez que com fibra a envolver a moldação como está previsto, e com a convecção no interior da câmara devido à limpeza das câmaras com Ar que sai das garrafas à temperatura ambiente, a temperatura nas paredes da câmara vai ser bem menor do que 1200ºC.

Na figura 6.35 pode ser visto a integração das câmaras de vazamento outros elementos, nomeadamente, falange do cadinho e câmara de fusão.

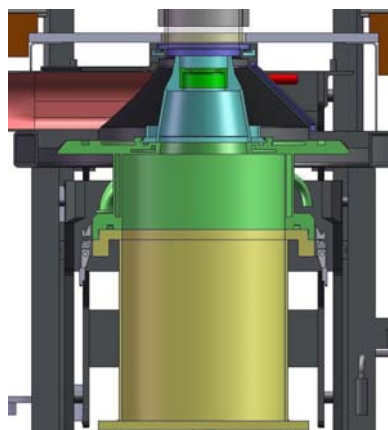



Figura 6.35 – Integração das câmaras de vazamento com a restante equipamento do forno.

6.4.3 - FALANGE DO CADINHO

A falange do fusível, figura 6.36, é outro dos principais elementos deste equipamento e aquele onde residem as maiores dúvidas acerca do seu desempenho

nas condições reais de trabalho, uma vez que é o elemento que vai estar mais exposto à temperatura e possível contacto com metal líquido.

Esta falange é constituída por dois elementos, o cone, elemento principal que serve de suporte a um outro elemento, base do fusível, colocado no interior do primeiro e onde assenta o fusível em cada fusão, figura 6.36. No total estes dois elementos pesam 5,5kg.

O cone é construído a partir de três elementos diferentes soldados entre si, a falange inferior, onde está construído o sistema de baioneta para ligação à câmara de vazamento superior, o corpo que é uma chapa de 5mm de espessura em forma cónica, e o cone superior, onde entra a base do fusível. Na falange inferior, está soldada uma chapa de 5mm, ao alto, e que tem a função de ser uma barreira ao metal fundido que possa cair do cadinho.

Para a base do fusível estão projectados dois elementos diferentes: o primeiro é um elemento único, a verde, que entra com uma folga entre 1 e 1.25mm por banda no cone superior. No centro deste elemento está a passagem do metal fundido, e um baixo revelo com a espessura de acordo com a espessura do fusível a utilizar, figura 6.36.

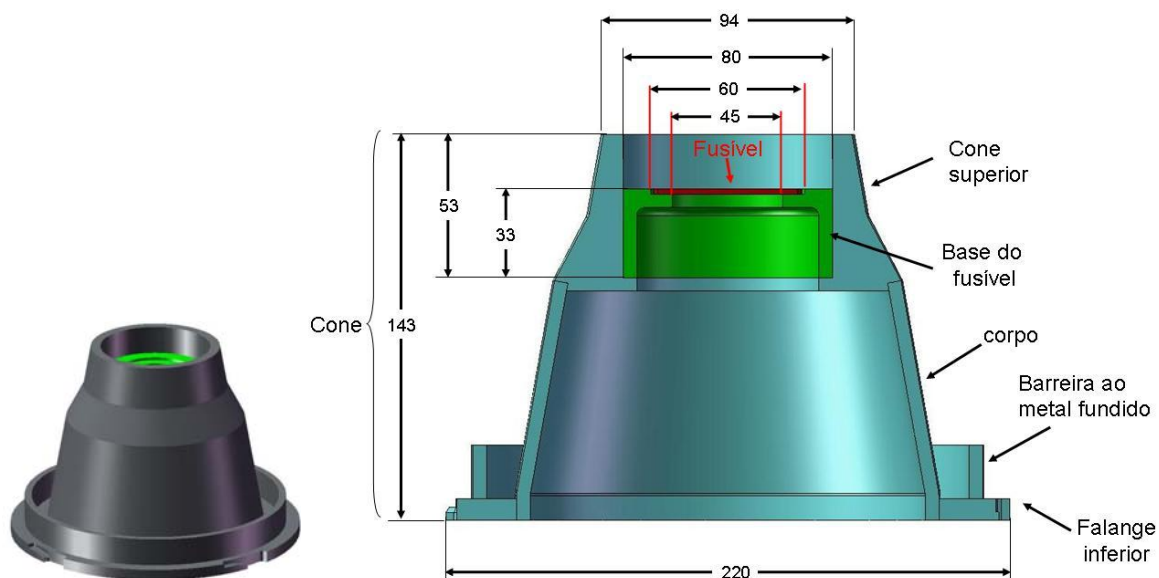



Figura 6.36 – Falange do cadinho. Corte da falange do fusível com os dois elementos que a constituem: cone e base do fusível.

O segundo elemento, na figura 6.37, é constituído por duas partes: uma inferior (a vermelho) que serve de base ao apoio do fusível, neste caso o fusível tem diâmetro igual ao diâmetro interior do cone superior (80mm). Em cima do fusível é colocado um disco (a violeta), que tem como função segurar partes do fusível que não fundem

e que podem ser arrastados para o interior da moldação provocando inclusões. Esta solução só vai ser implementada caso se verifique o que foi descrito atrás com a primeira solução.

Figura 6.37 – Segunda solução para fixação do fusível.

O conceito de ter um elemento amovível para base do fusível, surge pela necessidade de corrigir através de maquinagem a face onde o fusível assenta. Deste modo melhora-se o contacto entre estes dois elementos, promovendo assim uma melhor vedação entre eles, facilitando deste modo o controlo do diferencial de pressões entre as câmaras.

Ambos os elementos podem ser dimensionados em altura. Deste modo ajusta-se a altura que o cadinho entra dentro da falange do fusível. O diâmetro exterior de ambas as bases foi dimensionado de modo a permitir o aumento de volume com a expansão térmica, evitando a deformação dos elementos.

Tal como se pode ver na figura 6.38, a falange do fusível suporta o cadinho no topo, que assenta directamente no fusível e na base do fusível.

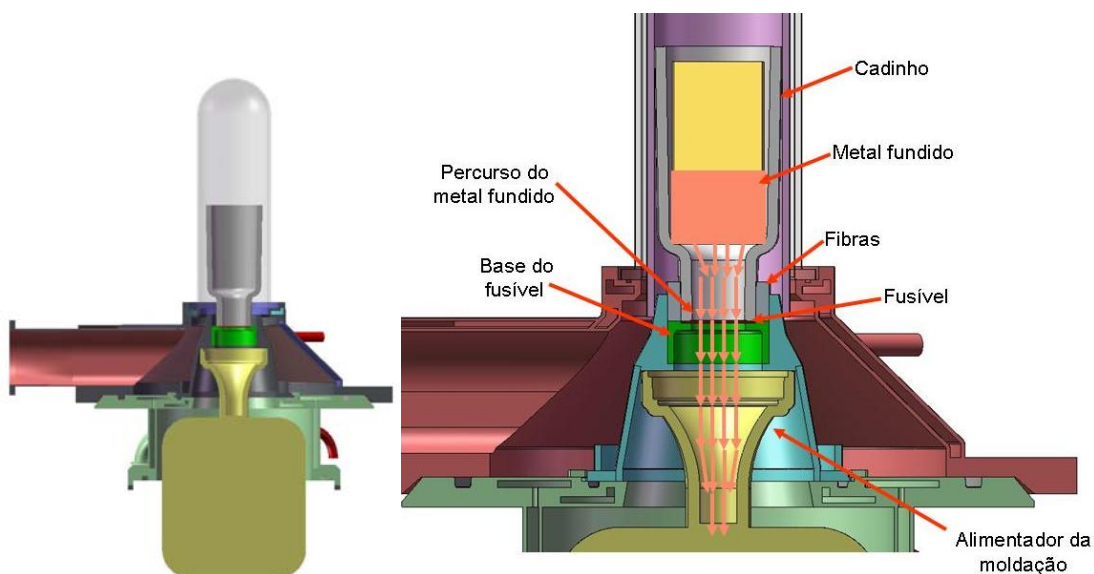



Figura 6.38 – Integração da falange do fusível com a câmara de vazamento, cadinho, fusível e moldação cerâmica. Pormenor da falange com cadinho e moldação.

A forma exterior cónica desta parte da falange tem duas razões, a primeira é promover espaço suficiente com a câmara de fusão, para a realização de vácuo no quartzo. A segunda tem a ver com a capacidade de remoção do metal líquido, que possa eventualmente sair de um cadinho menos resistente, para a falange inferior deste elemento.

Nesta falange inferior, a barreira ao metal fundido vai estar a menor temperatura por estar encostado à falange arrefecida da câmara de vazamento, e estar mais distante das zonas quentes (moldação e cadinho). Deste modo vai facilitar a remoção do metal que ficar ali acumulado.

Pelo lado oposto da falange do cadinho entra o alimentador da moldação cerâmica. A geometria cónica do corpo da falange serve como guia para centrar o alimentador com a gola do cadinho. A altura interna da câmara de vazamento, desde a base até à face horizontal interna da falange do cadinho, permite à moldação entrar com folga em altura e não ser comprimida no fecho da câmara. O ajuste da moldação à falange do cadinho pode ser feita com a introdução de um fundo falso no interior da câmara de vazamento, que permita o ajuste da moldação em altura.

Resumindo, para além da queda acidental de metal neste elemento, nas operações normais de fusão, ele vai estar sujeito a condições de temperatura muito adversas, como tal, e como já foi referido anteriormente, este é um elemento considerado de sacrifício. Está prevista a construção de dois ou três destes elementos, que serão usados alternadamente em cada fusão, de modo a aumentar o tempo de vida.

6.4.4 - SISTEMAS DE ACCIONAMENTO E ELEVAÇÃO

Neste equipamento foram projectados três sistemas de elevação, nomeadamente para a movimentação vertical da câmara de vazamento superior, da unidade de condensadores do forno de indução e posicionamento da câmara de vazamento inferior. Foi elaborada uma tabela com algumas soluções para o accionamento dos sistemas de elevação, que pode ser vista no anexo B.

Dos métodos de accionamento possíveis, foi dada especial atenção às soluções hidráulica e parafuso sem-fim. Foi ainda equacionada a possibilidade de adoptar uma solução pneumática, hipótese abandonada pela falta de robustez e a necessidade de maiores cuidados de manutenção. Assim, foram adoptados accionamentos hidráulicos para os sistemas de elevação da câmara de vazamento

superior e da unidade de condensadores, e um sistema de parafuso sem-fim para o posicionamento da câmara de vazamento inferior.

Apesar das massas envolvidas serem ligeiras (cerca de 150kg no máximo que inclui câmaras, moldação, cadinhos e água no interior da câmara), a escolha de uma solução hidráulica para accionamento destes sistemas baseou-se na enorme robustez que estes sistemas oferecem mesmo para condições adversas de trabalho. Como a precisão de movimentos, ou de posicionamento, não era um factor relevante para esta aplicação, os accionamentos baseados em motores eléctricos foram deixados de parte. Outra questão que se levantava na utilização destes sistemas eléctricos com parafuso sem fim era a sua fiabilidade em condições de trabalho adversas como é o caso da fundição.

No que diz respeito à elevação da câmara de vazamento inferior para o seu posicionamento em altura, este movimento é efectuado a partir do carro onde esta câmara se encontra pousada inicialmente. A opção hidráulica para este elemento iria obrigar à movimentação de mangueiras hidráulicas no percurso efectuado pelo carro ao longo da estrutura, o que tornaria a execução e a operação deste elemento complexa. Assim e como a distância a elevar é de apenas 250mm, foi decidido optar por um parafuso de potência associado a uma manivela.

6.4.4.1 - Sistema de elevação da câmara de vazamento superior

O curso total a realizar pela câmara de vazamento superior é de 650mm, desde a posição em que fecha com a câmara de fusão (cilindro no máximo do curso), até à posição inferior, para permitir fechar com a câmara de vazamento inferior (cilindro na posição recolhida). Assim, no início de uma operação de fusão, figura 6.39, a distância entre as duas câmaras de vazamento deve ser suficiente para que a câmara inferior, com a respectiva moldação no interior, deslize livremente até à posição de concentricidade com a câmara superior. A posição de concentricidade é conseguida através de um sistema fixo à estrutura principal e que roda em torno de um eixo vertical soldado à estrutura principal. Uma moldação de 6 turbinas de Ø99 fica cerca de 200mm fora da câmara de vazamento inferior.

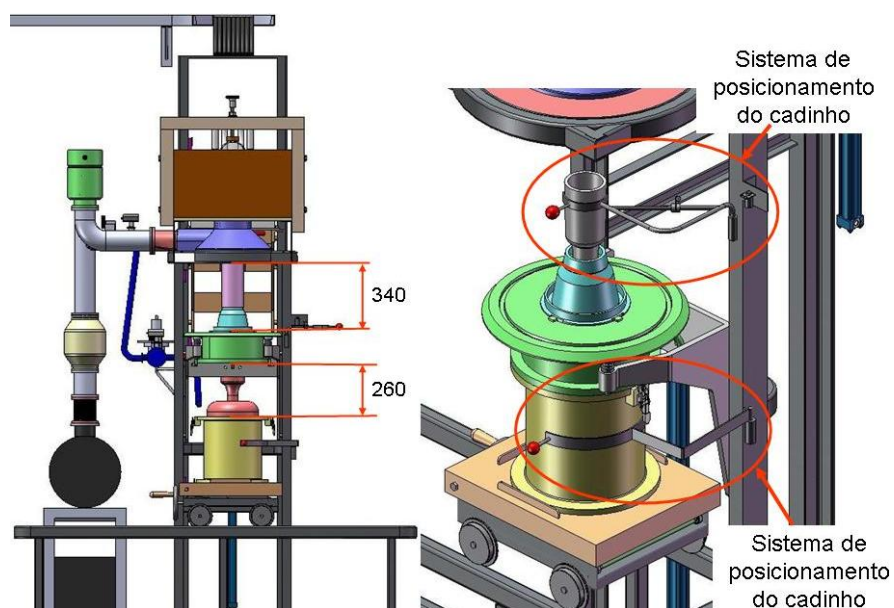



Figura 6.39 – Posição da câmara de vazamento para inicio da operação de fusão.

Quando a câmara de vazamento é fechada e é fixa a falange do cadinho, a concentricidade do cadinho com o quartzo é verificado através de um sistema idêntico ao da câmara de vazamento inferior.

O dimensionamento dos cilindros foi realizado com base nos procedimentos de cálculo do catálogo da Rexroth Bosch [3, 4]. Assim, e tendo por base o peso máximo a elevar (cerca de 150kg), foi iniciado um processo iterativo de escolha de um cilindro. Os sistemas de fixação do corpo e da haste foram escolhidos segundo este procedimento e de modo a ter disponível o curso máximo do cilindro. No final, o cilindro de menores dimensões do catálogo (Ø embolo 25mm, Ø haste 12mm) [3] cumpria com todos os requisitos. Porém dado o longo curso e a fina espessura da haste, foi decidido, a escolha da haste de 18mm para evitar problemas de empenos resultantes de fenómenos de encurvadura (depois de devido aconselhamento com técnicos da Bosch). Assim, as características do cilindro escolhido são as seguintes: Ø êmbolo 25mm, Ø da haste 18mm, curso 700mm, força de avanço 3.9kN, força máxima de retorno 2kN.

Como pode ser visto na figura 6.40, o cilindro encontra-se fixo pelo topo do corpo, a uma falange soldada à estrutura principal. No curso total do cilindro estão previstos dois fins-de-curso, um na posição inicial e outro no curso total do cilindro (0 – 650mm). O controlo dos movimentos de descida e subida do cilindro, entre os fins-de-curso, são da responsabilidade do operador.

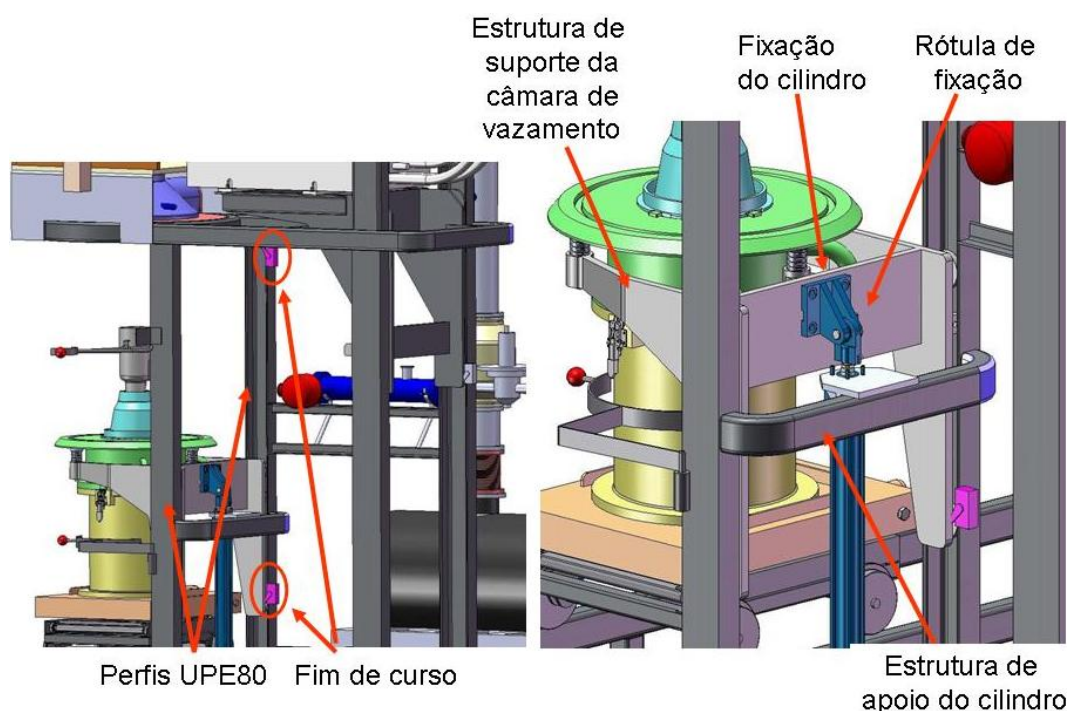



Figura 6.40 – Vista geral da fixação do cilindro hidráulico ao sistema da câmara de vazamento. Vista em pormenor das fixações do corpo e da haste do cilindro.

Como já foi visto anteriormente, a câmara de vazamento superior assenta em três molas equidistantes na estrutura que a suporta (figura 6.41). Este sistema de molas tem dupla função: evitar que força do cilindro seja realizada directamente na falange, permitindo assim distribui-la por três ponto e controlar a força aplicada nestes elementos mediante o ajuste do posicionamento do fim-de-curso superior; a outra função é permitir que estas falanges se auto-ajustem entre elas, eliminando assim o efeito de pequenos empenos que estas possam ter resultantes do normal funcionamento.

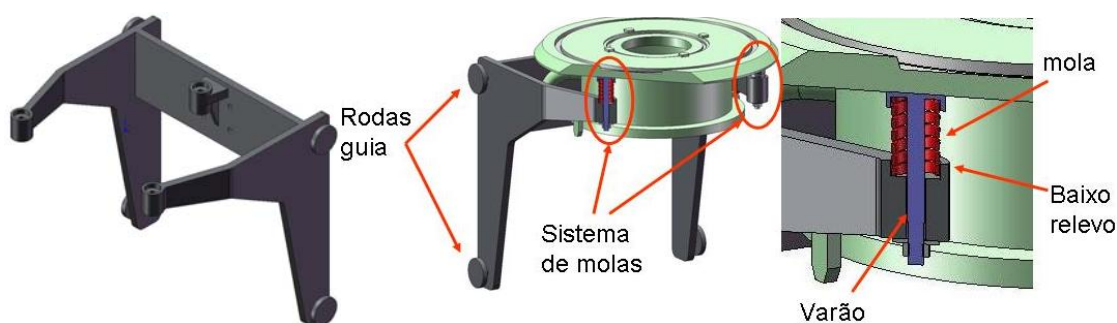



Figura 6.41 – Estrutura de apoio da câmara de vazamento. Sistema de fixação da câmara de vazamento superior à estrutura que a suporta. Pormenor da montagem da mola.

Os varões soldados na falange da câmara passam através da mola e são apertados com um parafuso na face inferior da estrutura de suporte. As molas são guiadas pelo exterior por uma zona de baixo-relevo maquinada na estrutura, e roscadas na falange na outra ponta. As características das molas são: Ø exterior 32mm, Ø

interior 12.5mm, comprimento 51mm, para a flexão máxima permitida, 40% do comprimento total, a força de cada mola é de cerca de 1300N.

A estrutura suporte tem a forma de um L invertido e é obtida por construção soldada em chapa de 15mm de espessura. A estrutura tem quatro rodas em aço, que se movimentam no interior dos perfis UPE 80. No que diz respeito às dimensões gerais da estrutura, a largura e a profundidade, foram determinadas pelas dimensões da câmara, e a altura pela redução do atrito nas rodas (figura 6.42).

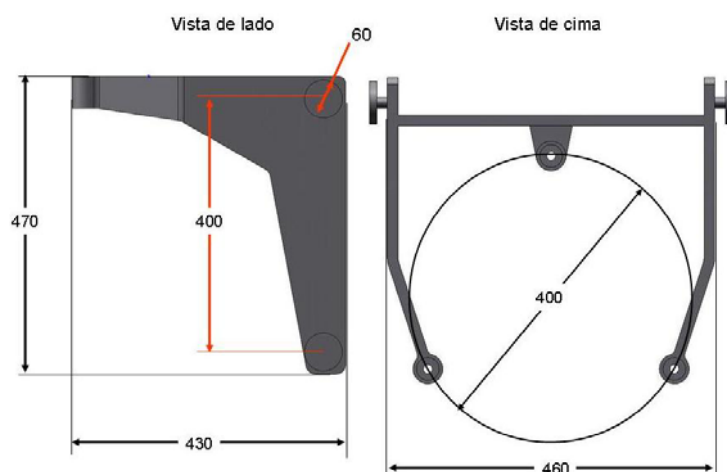



Figura 6.42 – Cotas gerais da estrutura de suporte da câmara de vazamento.

A redução do atrito nas rodas é conseguida com o aumento da distância entre eles, no mínimo esta distância deve ser superior à distância entre a fixação do cilindro, ao centro onde está aplicada a carga (neste caso no centro da câmara). O aumento desta distância reduz a reacção das rodas nos perfis, reduzindo assim a força de atrito nos movimentos.

Neste elemento também foram realizadas simulações de modo a prever o seu comportamento nas condições de trabalho. Assim uma aproximação que se fez foi considerar as rodas fixas e carregar as zonas de apoio com o peso da câmara, e a força resultante da compressão máxima das molas (1300N em cada mola). Foi também considerado o peso próprio da estrutura 27Kg. O ponto de fixação do cilindro foi considerado fixo. Os resultados podem ser vistos na figura 6.43 e anexo C.

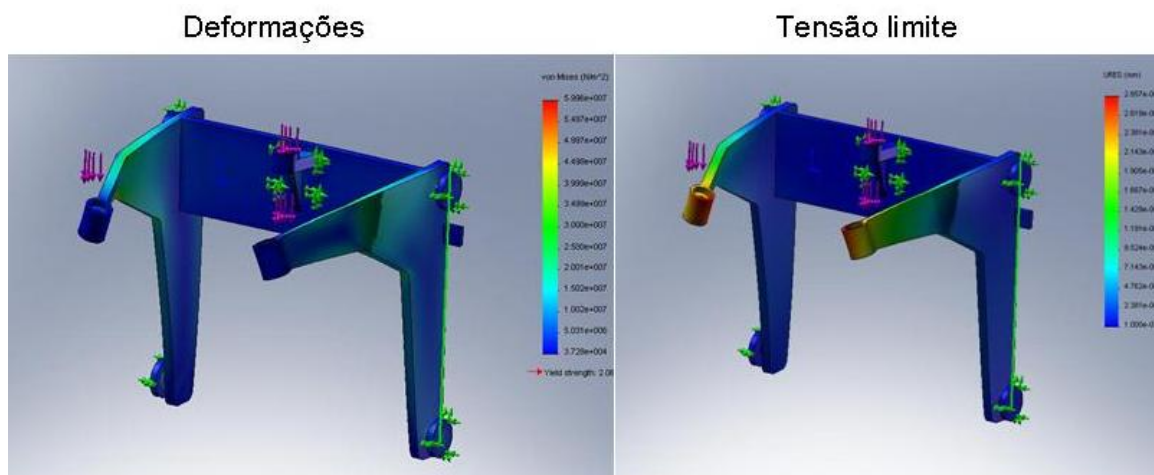



Figura 6. 43 – Simulação da estrutura de suporte da câmara de vazamento superior.

Como se pode constatar pela figura e pelo relatório do anexo C, a ponta desta estrutura é uma das regiões que pode ser crítica, uma vez que com cargas máximas vai estar sujeita a um momento torsor e um momento flector. Este elemento deve ser revisto antes da construção, porque apesar de a tensão limite elástico do material (aço de construção comum) nunca ser ultrapassada nas simulações, as sucessivas solicitações de operação podem levar à falha por fadiga.

6.4.4.2 – Sistema de elevação da unidade de condensadores

A estrutura que suporta a bateria de condensadores, á imagem do que acontece com a anterior, é em forma de L invertido e desloca-se através da solicitação de um cilindro hidráulico, e em 4 rodas nos perfis UPE100, figura 6.44.

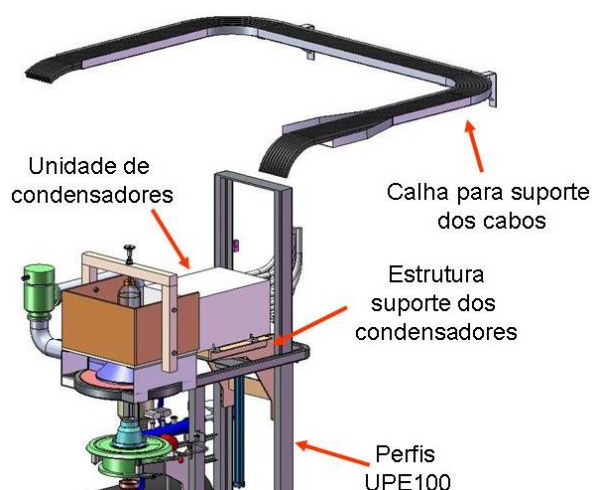



Figura 6.44 – Aspecto geral do sistema de elevação da unidade de condensadores.

O principal objectivo desta estrutura é poder implementar a técnica referida no ponto 5.2.2 (página 157) de ajustar a bobina à medida que decorre a fusão do metal. Outro requisito para o qual este sistema foi desenvolvido é para permitir a fácil e rápida

substituição do quartzo. A execução desta operação, e devido à geometria da bobine e do quartzo, obriga à remoção da bobine para poder retirar o quartzo da câmara de fusão, o que pode ser realizado através de uma das seguintes operações: retirar a bobine da unidade de condensadores (que obriga à remoção de várias ligações de água e das próprias ligações da bobine), ou subir a bobine a uma cota superior à do topo do quartzo. Deste modo definiu-se o curso máximo do cilindro de 550mm, o que permite subir o quartzo 100mm acima do topo do quartzo.

O peso da unidade de condensadores, carregado com os 16 condensadores, mais o volume de água total para arrefecer a unidade é de 63kg. A somar a este valor temos ainda o peso dos 16 cabos eléctricos que ligam esta unidade à unidade geradora de potência (16 cabos de 95mm^2), as ligações de água (entrada e saída no total de 4) e o peso da bobine na outra ponta da unidade de condensadores (peso 1,5kg).

De modo a reduzir o peso dos cabos, e das ligações de água, foi adoptado uma calha para cabos eléctricos suspensa a cerca de 3m do chão e fixa na parede que fica nas costas do forno de fusão e vazamento. Deste modo os cabos ficam suspensos na posição normal de funcionamento, reduzindo assim o seu peso a um valor residual, o peso máximo verifica-se para a situação de substituição do quartzo, com valor equivalente a 1m de altura. Para cálculo, foi utilizado a altura de 1,5m, o que equivale um peso de cerca de 25kg para os cabos eléctricos, e um peso de cerca de 2kg para as ligações de água. O peso total a elevar é de 91.5kg, para efeitos de cálculo foi utilizado o peso de 100kg. Na figura 6.45 pode-se ver a distribuição das forças na estrutura.

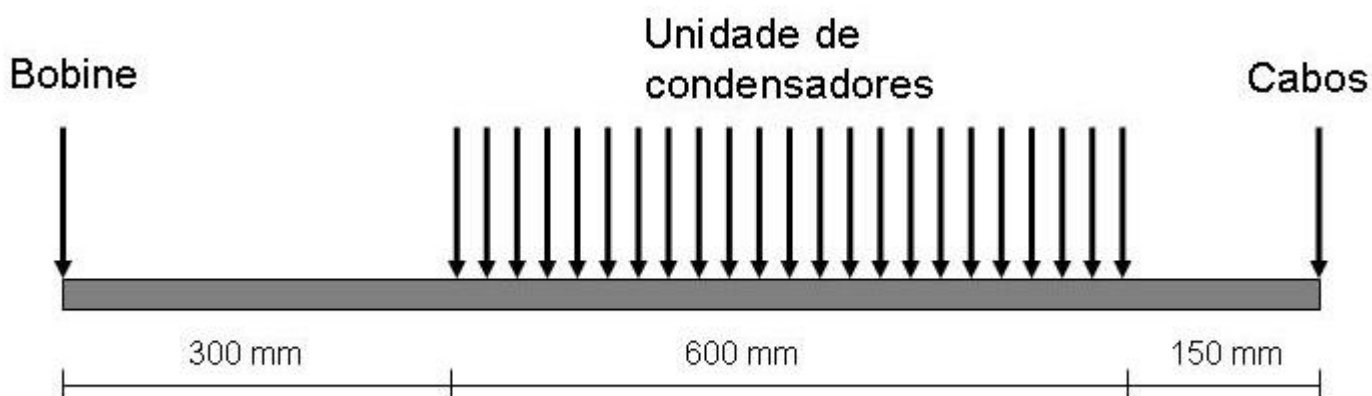



Figura 6.45 – Distribuição das cargas na estrutura suporte dos condensadores.

Um requisito essencial na construção deste sistema, era permitir o acesso à unidade de condensadores de modo a possibilitar realizar operações de remoção e acrescento de condensadores, e de manutenção (ponto 6.2, figura 6.3). Assim, uma das zonas laterais, e o topo da unidade de condensadores deveriam estar livres.

O equilíbrio deste sistema é fundamental de modo a conseguir um movimento vertical preciso da bobine pelo exterior do quartzo. A folga existente entre estes dois elementos é pequena (cerca de 3mm por banda), de modo a concentrar o mais possível todo o campo magnético produzido pela bobine na peça a fundir. A possibilidade de haver vibrações ou desalinhamento entre a bobine e o quartzo devem ser evitadas de modo a salvaguardar o quartzo, elemento dispendioso, uma vez que é feito à medida da aplicação.

Neste sentido, foi elaborado um procedimento de cálculo de forma a determinar a melhor localização do cilindro hidráulico e das guias, baseado na análise estrutural de um problema segundo a figura 6.46. As distâncias: **a**, **b** e **c** e as reacções **R1** e **R2**, são incógnitas. O apoio encastrado é o ponto de fixação do cilindro e foi estabelecido que **R1=R2** de modo a anular a força horizontal na fixação do cilindro que poderia provocar a flexão da haste do cilindro**.**

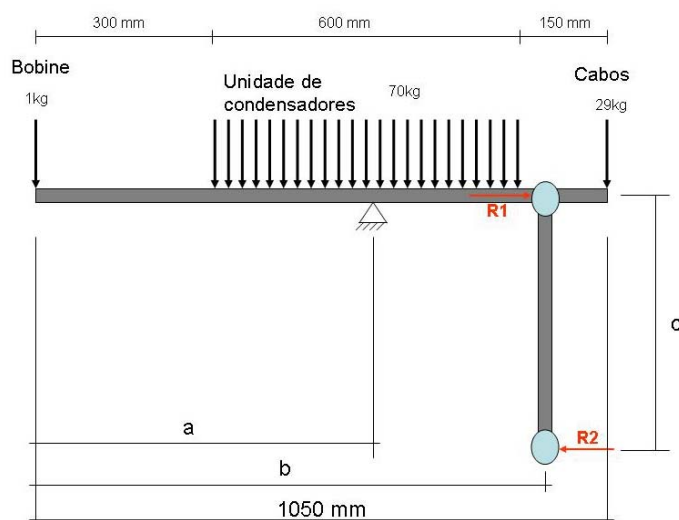



Figura 6.46 – Análise estrutural à estrutura dos condensadores. A azul, estão as rodas previstas com as respectivas reacções.

Assim, de modo a equilibrar as forças actuantes no sistema foram determinadas, em primeiro lugar as distâncias: **a** e **b**. A distância **b**, distância do eixo vertical das rodas, é irrelevante para este equilíbrio, e assim foi estabelecida em 970mm, de modo a colocar os perfis entre o fim da unidade de condensadores e o ponto onde os cabos

eléctricos caem. Deste modo não restringirem o acesso à unidade de condensadores.

A distância **a**, da posição do cilindro, foi obtida de modo a que as reacções R1 e R2 tivessem o menor valor possível. O posicionamento do cilindro (distância **a**) a cerca de 900mm do centro da bobine elimina as reacções R1 e R2, e equilibra o sistema. Ainda segundo este procedimento de cálculo, a força no cilindro é de 1450 N, já com o peso próprio da estrutura (cerca de 39kg). A esta deve ser somada a força de atrito do sistema de eliminação de folgas que será apresentado mais à frente neste ponto.

Seguindo o mesmo procedimento de cálculo de dimensionamento dos cilindros hidráulicos utilizado anteriormente, foi determinado um cilindro com as mesmas características de êmbolo e haste (Ø êmbolo 25mm, Ø da haste 18mm), curso 600mm, força de avanço 3.9kN e força máxima de retorno 2kN. Também aqui foi adoptado um diâmetro da haste superior ao calculado, para prevenir problemas de encurvadura.

De modo a controlar a força e a velocidade deste cilindro, foram adicionados a este circuito hidráulico uma válvula reguladora de pressão e outra de caudal, respectivamente. Pelas mesmas razões da escolha para o cilindro do sistema da câmara de vazamento, este também é fixo pelo topo do corpo à estrutura principal, figura 6.47. O curso do cilindro é limitado no principio e no fim por dois fim – de – curso fixos na estrutura principal do forno.

Relativamente à posição das rodas foi também adoptado o procedimento de cálculo anteriormente utilizado, e que visa a redução do atrito nestes pontos. Tal como acontecia no caso anterior, também aqui o aumento da distância entre rodas diminui o valor das reacções nestes pontos. As reacções nestes pontos, e apesar de pequenas uma vez que a força exercida pelo cilindro está limitada a um valor suficiente para elevar a carga, estão presentes sempre que a estrutura é solicitada, na subida ou descida. A distância entre os eixos das rodas foi estabelecida em 400mm, estando as rodas superiores alinhadas com o eixo horizontal da estrutura.

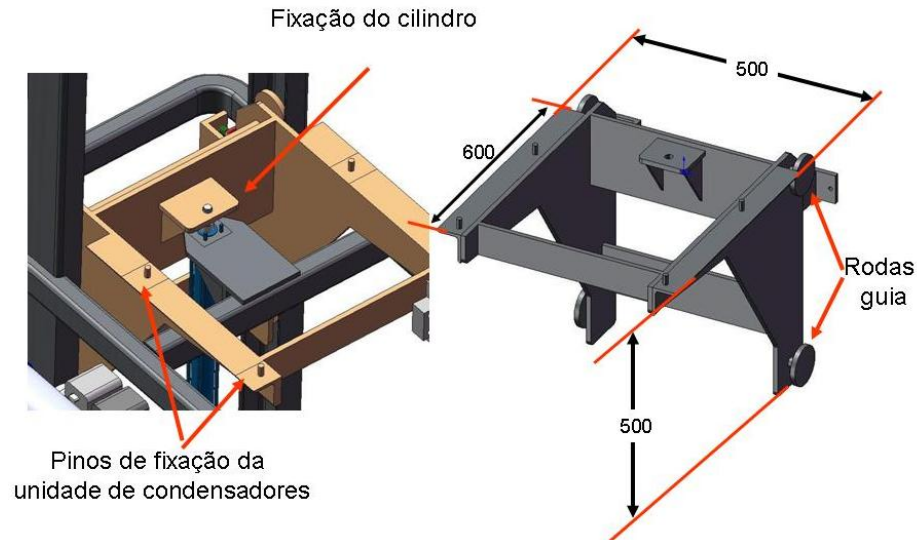



Figura 6.47 – Fixação do cilindro à estrutura principal.

De modo a diminuir a deformação da estrutura, nas zonas mais próximas da bobine, foram soldadas dois perfis em L, nas faces laterais da estrutura. Foram soldadas três barras: uma na parte horizontal, na frente, a segunda na parte vertical entre as rodas inferiores e a terceira na zona da fixação do cilindro entre as rodas superiores, para evitar a torção da estrutura para o interior.

Na parte posterior desta estrutura, ligeiramente abaixo das rodas superiores, foi montado de cada lado um sistema com um terceiro rodízio montado numa mola, que desliza na superfície exterior traseira dos perfis UPE100. Este sistema tem como função eliminar as folgas que possam existir entre as rodas interiores e os perfis UPE100, e que podem provocar alguma instabilidade na bobine na sua movimentação, figura 6.48.

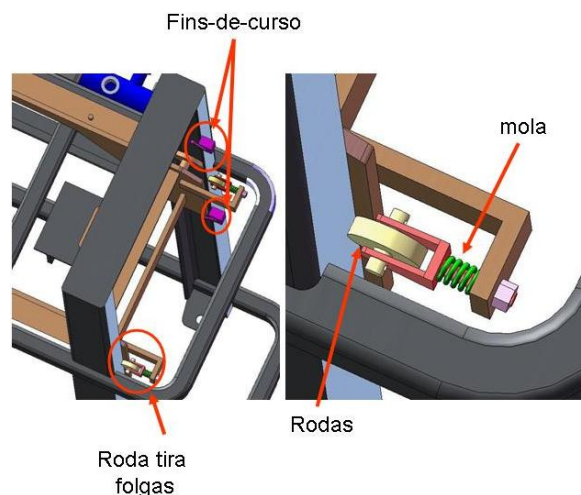



Figura 6.48 – Sistema para eliminação das folgas do sistema de elevação da unidade de condensadores. Vista geral e vista em pormenor.

Este sistema é constituído por um elemento (a vermelho) que suporta o rodízio numa ponta. Na outra tem um veio com Ø 7mm, roscado na extremidade que liga à estrutura suporte dos condensadores através de uma porca. No exterior do veio está uma mola (Ø exterior 16mm, Ø interior 8, extensão 25mm) com pré carga de 20% (cerca de 5mm), ao que equivale uma força de cerca de 200N por mola [7].

Esta produz uma força de atrito de cerca de 60N em cada roda. As rodas, com 78mm de diâmetro, rodam dentro dos perfis UPE100 com 3,5 mm de folga por banda, esta folga somada à pré-carga existente na mola corresponde a cerca de 35% da deformação da mola o que equivale a cerca de 280N por mola, o que dá uma força de atrito em cada rodízio de 84N. Assim, a força total que o cilindro precisa de vencer é de 1618N.

As simulações realizadas a este elemento permitiram identificar a zona da fixação do cilindro como aquela que estará sujeita a piores condições de operação com uma tensão de cerca de 60 MPa (foram utilizadas as propriedades do aço de construção 1020 com tensão limite elástico igual a 350MPa). De uma forma geral as tensões na estrutura estão bem abaixo do limite do material. As simulações permitiram também confirmar a correcta localização do cilindro e do eixo de deslocação das rodas, figura 6.49.

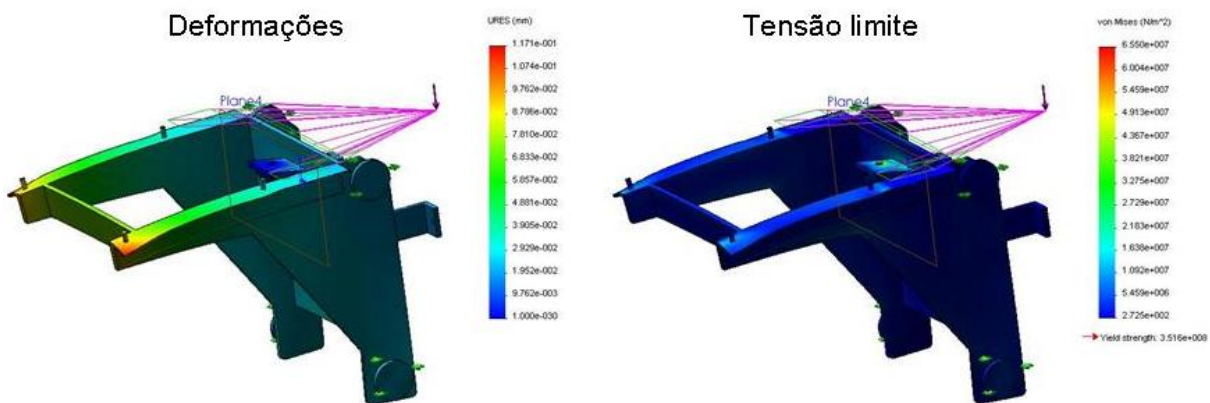



Figura 6.49 – Resultados da simulação realizada à última versão da estrutura para elevação dos condensadores.

6.4.4.3 – Sistema de elevação da câmara de vazamento inferior

Para ajustar a altura das diferentes câmaras de vazamento inferiores, ao nível da câmara de vazamento superior, foi projectado um carro com o tampo superior móvel, figura 6.50.

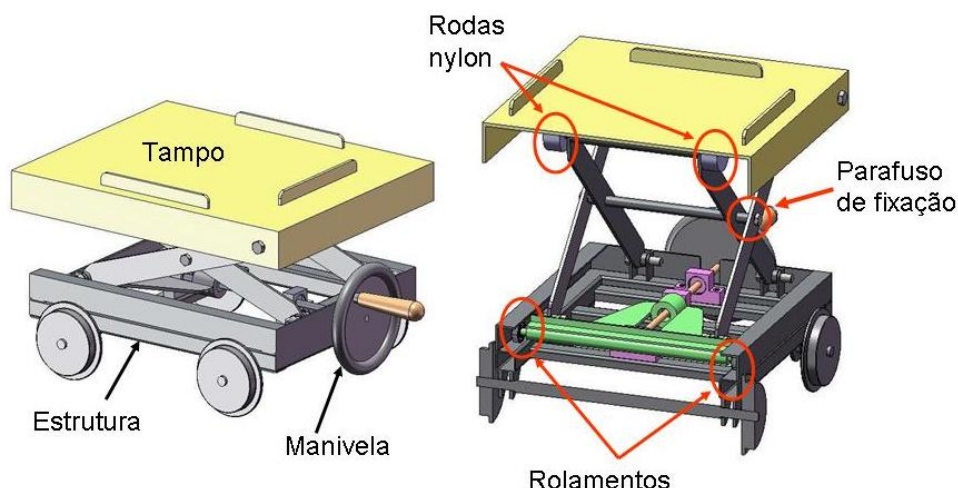



Figura 6.50 – Carro de movimentação das câmaras de vazamento inferiores.

Foi adoptado um sistema tipo tesoura que pode elevar o tampo superior 230mm a partir da posição inferior, por accionamento de um parafuso sem-fim através da actuação de uma manivela. Este sistema é formado por dois conjuntos de duas barras paralelas, fixos entre si no centro por um parafuso. Um dos conjuntos tem uma extremidade fixa à estrutura e na outra tem duas rodas em teflon que deslizam na superfície inferior do tampo. O outro conjunto, por sua vez, tem uma extremidade fixa no tampo do carro, e na outra tem dois rolamentos que deslizam na superfície superior da estrutura.

Através de um procedimento de cálculo foram determinadas as características do parafuso (diâmetro e passo) e da porca, necessárias para elevar a carga máxima prevista (1 moldação com 6 turbinas de Ø99mm após vazamento, mais o peso do sistema num total de 36.5kg).

Para elevar esta carga foi definido um parafuso trapezoidal de Ø 12mm, com passo de 3mm, comprimento total de 350mm e comprimento da rosca de 200mm. No que diz respeito à porca foi definida uma porca com altura de 30mm (10 passo de rosca). Com estes elementos é possível elevar uma carga de 4KN, 230mm, aplicando uma força na pega da manivela de cerca de 40N. Com estas características para o parafuso e para a porca, verifica-se a condição de auto – retenção do sistema, em qualquer ponto e para qualquer carga.

O parafuso, figura 6.51, está assente em dois apoios nas extremidades, entre eles existe um batente, que determina o fim do curso da porca. A porca (a vermelho) está fixa com uma chaveta no interior de um cilíndrico pertencente ao elemento de transmissão de movimento, fabricado por construção soldada (a verde). Na outra

extremidade, este elemento tem uma barra redonda a toda a largura interior da estrutura, com um rolamento em cada ponta, que deslizam nas guias da estrutura base.

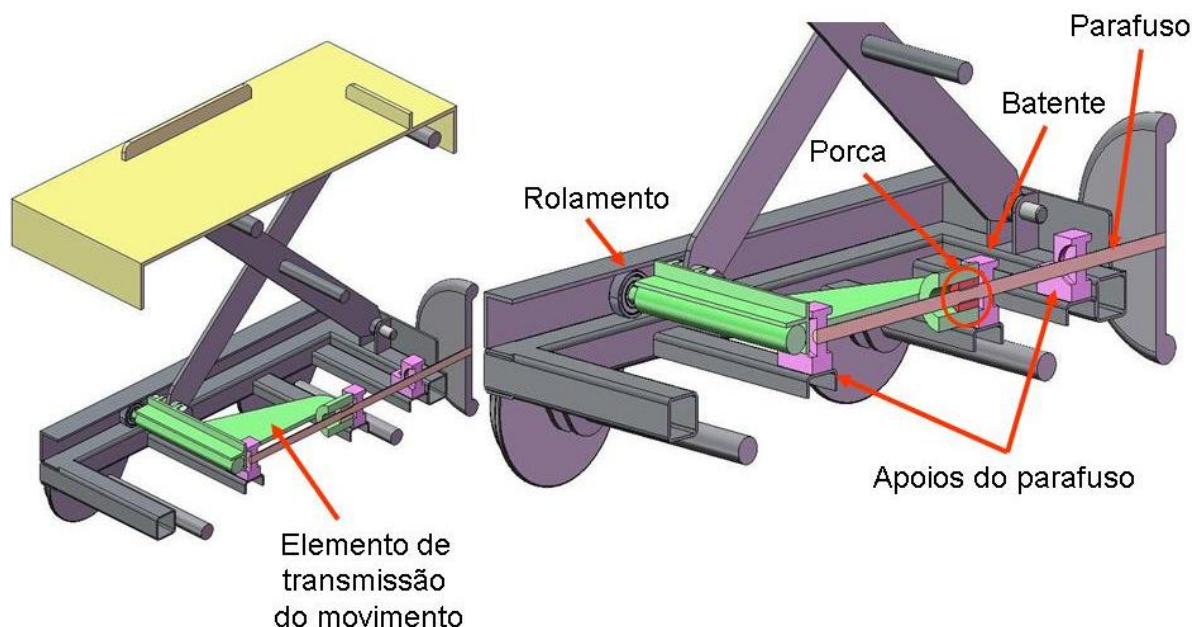



Figura 6.51 – Vista em corte do sistema de parafuso para elevação da câmara de vazamento. Vista em pormenor, do sistema da porca.

O carro tem 4 rodas de 100mm de diâmetro que assentam na frente da estrutura principal do formo. No lado interior as rodas têm uma face responsável por guiar o carro na estrutura, figura 6.52. No tampo existem três barras para posicionar a câmara de modo a alinhá-la correctamente a câmara de vazamento superior.

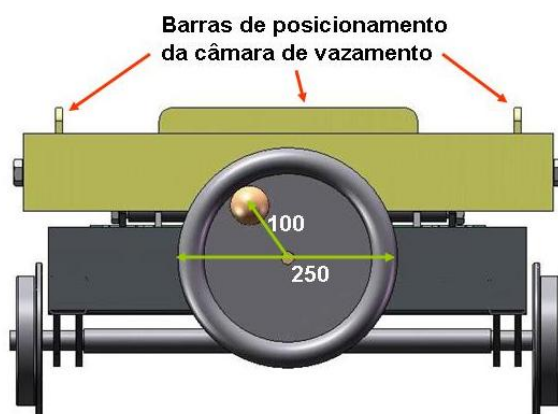



Figura 6.52 – Vista de frente do carro de elevação da câmara de vazamento inferior.

A geometria do quartzo apresentada na, figura 6.53, tem o topo em forma de sino, o conferindo maior resistência a uma zona que vai estar mais exposta à radiação directa durante a fusão. A espessura do corpo é de 4 ±0.5mm e da falange é de

8mm, esta é fabricada em quartzo opaco mais resistente mecânicamente do que o translúcido.

6.4.5 - SISTEMA DE FIXAÇÃO DO QUARTZO À ESTRUTURA

Como já foi referido, o quartzo assenta no topo da câmara de fusão, e é apenas comprimido contra um vedante existente nesta falange, através de um parafuso existente no topo de uma estrutura construída por vigas de madeira, figura 6.53.

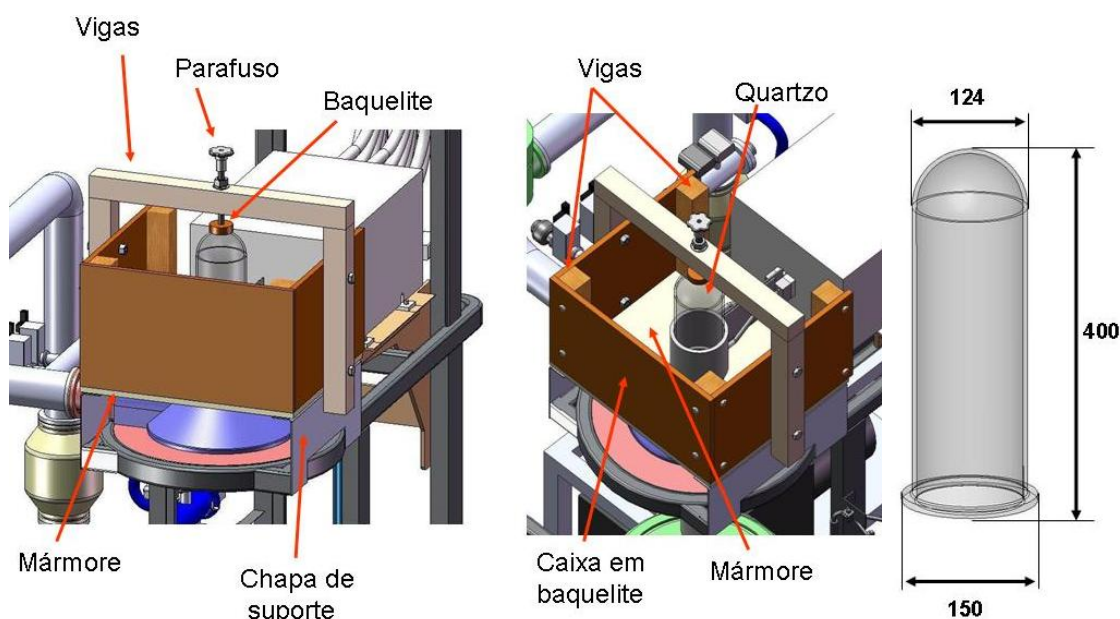



Figura 6.53 – Estrutura de fixação do quartzo e de protecção contra a radiação. Forma do quartzo.

Na viga horizontal, foi colocado um parafuso que permite ajustar o aperto do quartzo contra esta câmara de fusão para a sua fixação. A escolha deste ponto de aperto deve-se à maior capacidade do quartzo em aguentar forças à compressão do que à flexão, força a que estaria sujeito no caso de um aperto na falange da base.

O encosto do parafuso ao quartzo é feito com uma rodela de baquelite, revestida na base com fibra, para amortecer o encosto. Na vedação entre o quartzo e a câmara de fusão, está previsto o uso de um vedante tipo anel, com uma face plana que ocupe toda a falange de encosto da câmara de fusão. O material escolhido para este vedante foi Viton por ser um material mais denso, e deste ponto de vista melhor para o vácuo, e devido a suportar temperaturas de cerca de 200ºC.

A estrutura responsável pelo aperto do quartzo, é constituída por duas chapas de suporte de 3mm, que estão aparafusadas à estrutura principal. No topo destas chapas, é aparafusada uma pedra de mármore (baixa condutividade magnética e eléctrica) de cerca de 20mm de espessura e com uma forma rectangular (500 x

580mm). No centro, esta placa tem um furo de 140mm para passagem do tubo de quartzo. O objectivo desta placa é tentar cortar o campo magnético para a câmara de fusão, evitando assim as perdas para este elemento. Foram consideradas outras soluções para este elemento, tal como placas em Celeron ou placas à base de fibras de vidro com ligante em resina próprias para isolamento de altas temperaturas e resistências eléctricas, porém os preços são mais elevados e tratando-se de resinas podem deteriorar-se mais rapidamente.

Assente nesta placa de mármore, está uma espécie de uma caixa em baquelite, constituída por três placas 20mm de espessura. As placas de baquelite são coladas entre elas, e aparafusadas a quatro vigas de madeira colocados nos cantos interiores deste conjunto. Na base das duas vigas frontais entra um parafuso responsável pelo aperto da placa de mármore às duas chapas de suporte. O objectivo desta construção em baquelite é a eliminação da intensa radiação produzida durante a fusão do metal.

Nas paredes laterais das placas de baquelite estão aparafusados duas vigas da estrutura de madeira que aloja um parafuso M12 para aperto do quartzo à câmara de fusão. A remoção deste conjunto para substituição do quartzo, pode ser realizada em conjunto, ou seja, remover os dois parafusos de aperto à placa de mármore base, e remover, em caso de ser necessário o parafuso de aperto do quartzo.

6.5 – SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A unidade de potência, a câmara de fusão e a câmara de vazamento superior, precisam todas elas de ser alimentadas com água para refrigeração durante o normal funcionamento do forno de fusão e vazamento.

Para refrigerar estes três elementos, foi realizada uma adaptação ao sistema de refrigeração de uma unidade de fusão por indução Inductotherm (3 fornos) existente no INEGI. Este sistema de refrigeração é um circuito fechado de água que circula entre o forno, 2 bombas (uma delas é de reserva), e uma torre de arrefecimento. Foi realizada uma picagem neste circuito que permite a utilização deste sistema no equipamento desenvolvido. Este sistema fornece água ao forno Inductotherm com as seguintes características: pressão 4 bar e temperatura entre 15ºC – 30ºC. Como este novo equipamento vai estar fisicamente muito perto do forno Inductotherm, as

características da água à entrada da unidade de potência e das câmaras vão ser muito semelhantes.

Na unidade de potência as características da água à entrada deverão ser as seguintes [2]:

- Pressão máxima de 7bar. Deve ser garantido que a pressão entre a entrada e a saída da unidade de potência é no mínimo de 3,5 bar;

- Temperatura entre os 18 – 35ºC;

- Caudal superior a 32 l/min.

Uma vez que as características da água na unidade de potência e condensadores são mais exigentes do que as necessárias nas câmaras, e de modo a facilitar a implementação de ambos os sistemas de refrigeração, foram adoptadas as mesmas características para as câmaras de fusão.

Assim, e no que diz respeito à pressão máxima da água no interior das câmaras as paredes de 3mm adoptadas e as próprias dimensões das câmaras oferecem resistência suficiente para este valor de pressão. Ao mesmo tempo, a capacidade de arrefecimento é garantida. Foram realizadas as seguintes aproximações a eventuais cenários extremos no interior das câmaras, de modo a verificar a validade da espessura de parede: derrame de Ti fundido nas paredes da câmara, paredes sujeitas apenas à radiação (supondo um ambiente de vácuo absoluto) e paredes sujeitas à convecção livre de Ar.

Admitindo um caudal de 15 l/min (metade do caudal necessário para a unidade de potência) e a temperatura máxima da água de 35ºC, as temperaturas nas paredes interiores das câmaras apresentam valores entre ao 60 – 70ºC. Mesmo para espessuras de parede superiores (5 -8mm).

Ao nível da unidade de potência existem vários interruptores de caudal (flow switches) e sensores de pressão nas entradas e saídas dos seguintes elementos: unidade de condensadores, bobine, cartas de potência, e cartas dos onduladores; de modo a evitarem o funcionamento fora das características pretendidas da água de refrigeração [2].

Assim foi adoptado a visualização da pressão e caudal, e o controlo da temperatura logo nas tomadas de água, antes da distribuição para a unidade de potência a para as câmaras. Foram colocados um rotâmetro e um manómetro neste ponto, bem como uma sonda de temperatura. Foi ainda adquirido um interruptor de fluxo (para 15 l/min) para a entrada de água no circuito de refrigeração das câmaras, de modo a evitar o arranque do forno caso não esteja presente o caudal de água mínimo necessário.

Bibliografia Capítulo 6

[1].Corp. (**2004**). *"Titanium ISM furnace."* www.consarc.com.

[2].Fiveceles (**2007**), *"Instructions manual for water cooling MOS transistors generators"*,fiveceles,pag.

[3].group (**2007**), *"Hydraulic Cylinders catalogue"*,Bosch Group,pag.

[4].Hatami (**2007**), *"Coletânea de fórmulas hidráulicas"*,Rsxroth - Bosch Group,pag: 42.

[5].Mann+Hummel (**2007**), *"Catálogo - Filtros de vazio"*,Mann+Hummel pag.

[6].Mittal. (**2008**). *"UPE perfil europeu de abas largas."* www.constructalia.com.

[7].springs (**2002**), *"Catálogo: Die springs to ISO10243"*,Special Springs,pag: 31.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7– CONCLUSÕES

O principal objectivo deste projecto foi o desenvolvimento de um forno de indução para fusão e vazamento de ligas de titânio e outras ligas reactivas. Com base nos resultados obtidos, pode dizer-se que este objectivo foi atingido. No término desta tese de mestrado, o projecto, desenvolvimento e compra de equipamentos e acessório foi concluído, estando nesta fase a decorrera montagem dos diferentes componentes.

Apesar deste forno ainda não estar pronto, os testes de soluções realizados ao longo do projecto, garantem que o equipamento desenvolvido vai permitir a obtenção por fusão em atmosfera inerte controlada, de peças de paredes finas em ligas de titânio e outras ligas reactivas.

No seu todo, o equipamento desenvolvido apresenta as seguintes características que o distinguem dos equipamentos actualmente existentes para este tipo de aplicações:

1. Modularidade de operação do equipamento

Tanto no que diz respeito ao equipamento desenvolvido, estrutura e elementos do corpo do forno, como equipamentos que foram adquiridos, principalmente a unidade de potência, a estratégia adoptada foi no sentido de desenvolver um equipamento o mais flexível possível, de modo a garantir o mesmo desempenho quer em aplicações experimentais (mais iniciais no projecto COMTICAST), quer em aplicações pré-industriais (para pequenas séries, em ambiente industrial).

A câmara de vazamento foi dividida em duas partes, uma fixa e outra amovível de acordo com a moldação a vazar. Num processo pré-industrial (ou mesmo industrial), podem existir várias destas câmaras amovíveis, uma vez que o equipamento permite

na mesma zona de trabalho, montar a moldação na câmara fora da zona de fusão, fundir e retirar o fundido num outro ponto mais avançado desta zona, em simultâneo.

O forno permite ainda o ajuste da posição da bobine em relação à carga de metal a fundir, de modo a poder controlar a fusão. Sendo esta uma técnica conhecida na fusão de outros metais, pode ser aqui explorada de modo a permitir atingir o sobreaquecimento do metal pretendido e a eliminação do fusível.

2. Flexibilidade dos procedimentos de fusão e vazamento

Controlo independente das pressões nas câmaras de fusão e vazamento – em cada uma das câmaras foram colocadas ligações de vácuo e Ar, sensores de vácuo e de sobrepressão, controlados através de um controlador dedicado a cada câmara. Os sistemas de vácuo da câmara de fusão e vazamento são tratados com dois elementos independentes, que torna mais fácil o ajuste das pressões entre as duas câmaras;

O ajuste da espessura do fusível permite a obtenção de maior temperatura de vazamento do metal. Possibilidade de utilizar a técnica referida no ponto 1 para ajuste da bobine para o mesmo efeito.

3. Melhor ajuste e maior flexibilidade das características da unidade de indução

A unidade de potência escolhida oferece a possibilidade de ajustar os parâmetros de fusão (frequência, potência e corrente) para diferentes tipos de metais e de quantidades de metal a fundir. Este ajuste é feito com a adição ou remoção de condensadores à unidade.

A unidade de potência foi testada com sucesso para quantidades entre 200gr e 3Kg, com tempos de fusão abaixo dos 3min inicialmente pretendidos.

A potência é fornecida através de um sistema de 4 cartas electrónicas de 25Kw. Estas cartas podem ser removidas, em caso de avaria de alguma delas, continuando o sistema a funcionar com a potência restante.

O ruído produzido pela bobine durante o processo de fusão, normal na generalidade dos sistemas de fusão a trabalhar com baixa frequência, foi significativamente reduzido.

4. Compactação do sistema

A compactação conseguida com o equipamento desenvolvido ficou demonstrada com a comparação com o equipamento para fusão e vazamento destas ligas, proposto pela empresa ALD (Alemanha).

O equipamento desenvolvido tem uma área de implantação de 3x3m ($9m^2$), e altura total de 3m (contando com a calha porta cabos). A capacidade máxima de fusão é de 5kg de titânio ($0.56Kg/m^2$), que comparativamente com o da ALD, que para a fusão e vazamento de 10Kg Ti, ocupa $45m^2$ ($0.22Kg/m^2$). Demonstra que este equipamento possui mais do dobro da capacidade de fusão por metro quadrado.

5. Segurança de operação

O conceito de passar a bobine indutora por fora de um quartzo, garante o não contacto entre a água de refrigeração da bobine com o Ti liquido , em caso de haver eventuais fissuras no cobre da bobine, o que poderia causar sérios riscos de explosão e de acidentes graves com as pessoas envolvidas no processo de fabrico.

Capítulo 8

Propostas para trabalhos futuros

8 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho surgiram algumas ideias para a realização de projectos futuros, tendo como objectivo complementar e/ou melhorar o projecto actual: Destes salientam-se os 4 mais pertinentes e possíveis de realizar praticamente de imediato:

- Implementar um sistema e procedimento de arrefecimento do fundido logo após a fusão – Como foi referido as câmaras de fusão e vazamento só podem ser abertas após o fundido atingir temperaturas abaixo dos 500ºC, com risco de contaminar o fundido. Assim foram iniciadas neste projecto algumas pesquisas e estudos no sentido de implementar um sistema fechado de circulação de um gás inerte (tipo Ar) a baixa pressão pelo inteiro da câmara, para depois ser arrefecido num permutador. Foram já estabelecidos alguns contactos e recolhidas propostas para ventiladores para este efeito. Quanto ao permutador pode ser usado o de um frigorífico velho desde que esteja sem fugas.

- Estudar o processo de fusão e vazamento, de modo a automatizar o procedimento. Propõe-se o conhecimento exacto dos vários parâmetros de fusão e vazamento, nomeadamente: pressões diferenciais, sobreaquecimento do metal, perdas da bobine para elementos adjacentes, espessuras do fusível, controlo em altura da bobine, tempo/temperatura para arrefecimento do fundido sem contaminação. Obter resultados padrão para determinadas características de fusão e vazamento, por comparação com a fusão e vazamento no forno de cadinhos frios (IFIMUP);

- Automatização do processo de fusão, vazamento e arrefecimento do fusível no interior da câmara de fusão;

- Adaptação deste forno para poder fundir com cadinhos frios. O facto do quartzo ser um elemento feito por medida, permite que esta adaptação seja possível apenas substituindo o tubo quartzo.

ANEXO A

DESIGN AND OPERATION OF VAR FURNACES

Adaptado do artigo: *"safety- Related Problems in the Titanium Industry in Last 50 Years"; JOM 52(5); 2000*

*****

Design and Operation of VAR Furnaces *

1. Loss of water flow shuts off the furnace power. This feature is checked prior to the start of each melt. One rectifier is turned on, then the water is turned off; the rectifier must turn off, verifying the functionality of the safety circuit.

2. There must be an effluent water temperature monitor system. If the effluent water from the furnace has more than a 20°C temperature rise over the input, the system should be checked.

3. Each furnace should have a minimum of two redundant water supplies. If one fails, the system automatically switches to other. Ideally, one system is a gravity flow system with at least 60 ft of head.

4. There must be a vacuum system that continues to operate even with higher furnace pressure.

5. A pressure sensitive control system that terminates melt at one half an atmosphere (i.e., at 14 inches of mercury absolute or below) should be included.

6. Explosion ports should be placed on each furnace. The type recommended would vent, then reseal to prevent air in-rush.

7. The furnace operator should be in an isolated control room protected from the furnace area with barricades. The furnace may be housed in vaults to accomplish the operator's safety. In no case should the operator be located adjacent to the furnace without protection.

8. Where possible, operations, such as electrode preparation, should be remote from the operating furnace location.

9. With the current state of the art video cameras, operators should not be required to spend extended periods of time next to operating furnaces.

10. Inert gas flooding of the furnace prior to opening is recommended.

11. Anti-backup and short arc control systems should be incorporated into the control system for each furnace. Long arcs lead to arced crucibles.

12. A solenoid-type arc-focusing coil should be installed on each water jacket to prevent the arc from attaching to the crucible wall.

13. Every effort should be made to maintain straight electrodes that are concentric with the stub, ram, and crucible.

14. All parts and pieces of electrodes produced from bulk weldable material must be securely welded in place to avoid arcing to the crucible.

15. Where practical, furnaces should be designed with X-Y control and equipped with video cameras to maintain the electrode in the center of the crucible.

16. NaK cooling of crucibles is a desired alternative to water-cooling.

17. Positive-type bottom supports for crucibles, which are capable of holding the bottom in place if fasteners are arc damaged, should be included.

18. The operator and other personnel should not be allowed in the 30ft diameter at-risk zone around the top of the furnace when melting is in progress.

19. As a rule, manual shut-off valves should never be installed in the drain lines from the water jacket and furnace cooling system. If one is installed, it should be equipped with a safety monitor system that will not allow a melt to be started with the valve closed.

20. Only operators who have been trained and certified should be allowed to run a melt.

Handling Titanium Powder

1. Avoid any condition that tends to suspend or float powder particles in the air.

2. Avoid every possible action that generates static electricity, creates a spark, or otherwise results in reaching the ignition temperature.

3. Where generation of static electricity may occur, utilize every means to minimize it and dissipate it (by grounding) to avoid a spark discharge.

4. Take steps to limit the size of a fire or explosion and to hold any resulting damage to the very minimum.

5. Do not allow powder particles to become suspended in the air in a room where titanium powder is being processed or handled. The less dust in the air, the better, as the lower limit is indefinite. It is presently considered to be 0.02-0.03 oz/ft^3 -an extremely small amount. Titanium dust will ignite with as little as 9% oxygen, with the balance helium or 3% oxygen with the remainder carbon dioxide. Titanium will ignite in carbon dioxide.

6. In transferring titanium powder, dust clouds should be kept at a minimum. Powder should be transferred from one container to another with as little agitation as possible.

7. In mixing titanium powder with other dry ingredients, frictional heat should be avoided. The best type of mixer for a dry-mixing operation is one that contains no moving parts, but affects a tumbling action such as a conical blender. The introduction of inert atmosphere in the blender is mandatory where dust clouds are generated. All equipment should be well grounded.

* *Taken from Aluminum Technology Edited for Titanium, by Eldon Poulsen.*

ANEXO B

DIAGRAMAS E TABELAS

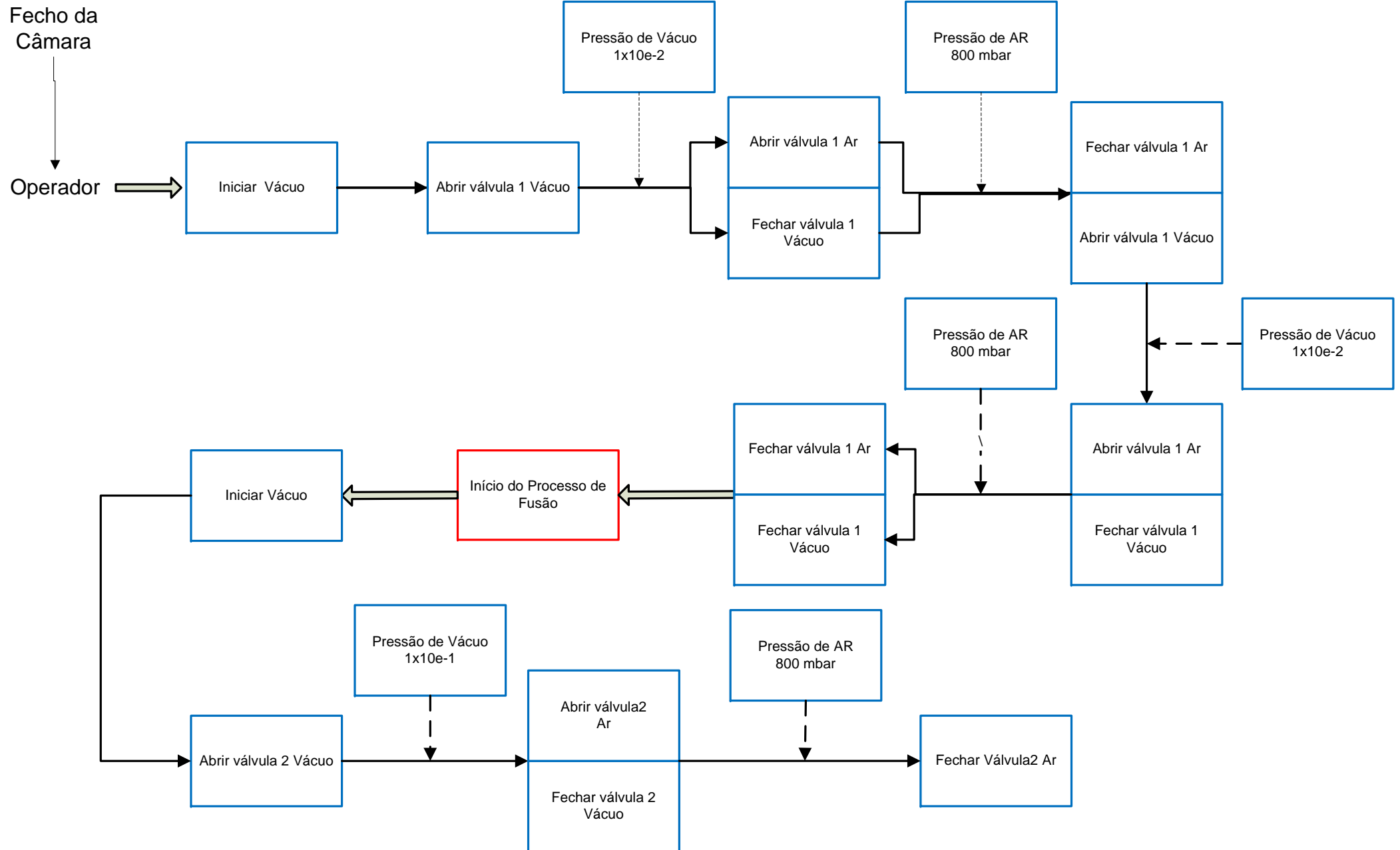
ENERGIA
TITÂNIO/CADINHO/
MOLDAÇÃO|
ÁGUA ARREFECIMENTO
Forno
EN. CALORIFICA
CADINHO USADO
PEÇAS FUNDIDAS
ÁGUA ARREFECIMENTO

Água Refrigeração
Gás Inerte
Titânio
Cadinho
Energia
Unidade de potência
Converter energia num campo magnético
Energia
Fechar câmara(s)
Fusão
Radiação
Bombas de vácuo
Converter energia caudal/pressão de vácuo
Energia
Titânio Fundido
Gás Inerte
Gás Inerte
Carapaça
Água refrigeração
Vazamento
Arrefecer fundido
Peças Fundidas
Cadinho Usado

Alterações	Requisitos	Solução	
	1. Sistema de vácuo		
	1.1 Efectuar Vácuo	Sistema de vácuo com 2 bomba Roots + primária	V
	1.2 Medir pressões	Conjunto de controlo com pirani e piezo	
	1.3 Vávula Câmara 1 Vácuo	Válvula electro-pneumática DN100	
	1.4 Válvula Câmara 1 Árgon	Válvula electro-pneumática DN16	
	1.5 Válvula Câmara 2 Vácuo	Válvula electro-pneumática DN25	
	1.6 Válvula Câmara 2 Árgon	Válvula electro-pneumática DN16	
	1.4 Injecção Árgon	Garrafa Ar, redutor de pressão	
	1.5 Protecção bombas anti-partículas, humidade, água	Filtro, trap	
	2. Sistema de refrigeração		
	2.1 Arrefecer água dos circuitos	Chiller; permutador	
	2.2 Controlar pressão	Manómetro	
	2.3 Controlar caudal	rotâmetro	
	2.4 Corte de abastecimento de água	Válvulas borboleta	
	2.4.1 Detector de água no circuito (função de não deixar arrancar o sistema em caso de alimentação de $H2O$)	Interruptor de fluxo	
	3. Sistema de indução		
	3.1 Potência	Unidade de potência	
	3.2 Gerar calor	Bobine	
	4. Sistema de ajuste da bobine		
	4.1 Movimentar bobine		

Alterações	Requisitos	Solução	
	4.2 Posicionar bobine 4.3 Accionar/controlar o movimento		
	5. Sistema de movimentação da câmara 2		
	5.1 Elevar/baixar câmara 2 5.2 Controlar velocidade do movimento 5.3 Detectar posições (fecho, abertura) 5.4 Accionar o movimento do sistema	Cilíndrico hidraulico electro - válvulas, filtros, Válvulas Fins de curso	

PRINCIPIO DE OPERAÇÃO

Sistema de Vácuo

Forno de indução	TABELA MORFOLÓGICA – sistemas de accionamento	

Soluções / **Sub-funções**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Movimentar Bobine	Motor eléctrico	Pneumática	Hidráulica	Mecânica			
Transformar movimento para bobine	Cilindro Hidráulico	Cilindro pneumático	Parafuso sem-fim	Pinhão cremalheira	Parafuso de esferas	Correia dentada	
Detectar posição bobine	Motor passo a passo						
Movimentar câmara 2	Cilindro pneumático	Cilindro Hidráulico	Motor eléctrico	Mecânica			
Transformar movimento câmara 2	Cilindro Hidráulico	Cilindro pneumático	Parafuso sem-fim	Pinhão cremalheira	Parafuso de esferas	Correia dentada	
Detectar fecho/abertura da câmara 2	Fim de curso						

ANEXO C

SIMULAÇÕES

Stress analysis of Câmara de vazamento superior

---

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on Meia Cam2_V5V2V6

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

---

2. File Information

Model name:	Meia Cam2_V5V2V6

Model location:	D:\Bruno\mestrado\Tese\Versão final 6\Meia Cam2_V5V2V6.SLDPRT
Results location:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Study name:	Camara de vazamento superior (-Default<As Machined>-)

---

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	Meia Cam2_V5V2V6	AISI 304	32.829 kg	0.00410363 m^3

---

4. Load & Restraint Information

Restraint	
Restraint-1 <Meia Cam2_V5V2V6>	on **2 Face(s)** fixed.
Description:	

Load		
Force-1 <Meia Cam2_V5V2V6>	on **3 Face(s)** apply normal force **500 N** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Force-2 <Meia Cam2_V5V2V6>	on **2 Face(s)** apply force **500 N** normal to reference plane with respect to selected reference **Edge< 1 >** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Gravity-1	Gravity with respect to **Edge< 1 >** with gravity acceleration **9.8**	Sequential Loading

	m/s^2 normal to reference plane	
Description:		
Temperature-1 <Meia Cam2_V5V2V6>	on **2 Face(s)** with temperature **1200 Celsius**	
Description:		

---

5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Alternate
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	20.016 mm
Tolerance:	1.0008 mm
Quality:	Draft
Number of elements:	12376
Number of nodes:	3687
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:00:38
Computer name:	BRUNO

Solver Information	
Quality:	Draft
Solver Type:	FFEPlus
Option:	Include Thermal Effects
Thermal Option:	Input Temperature
Thermal Option:	Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin

6. Contact

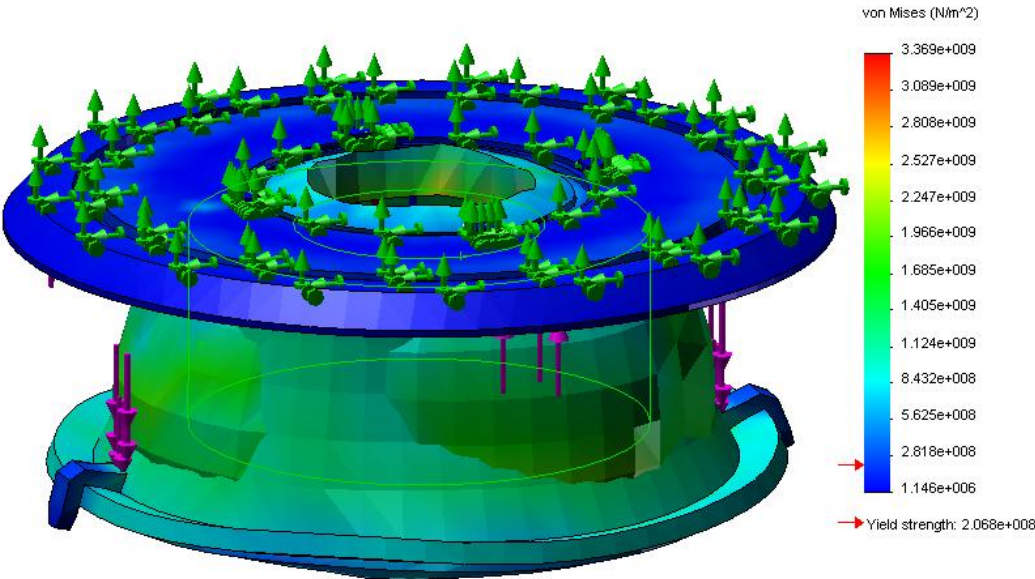
Contact state: Touching faces - Bonded

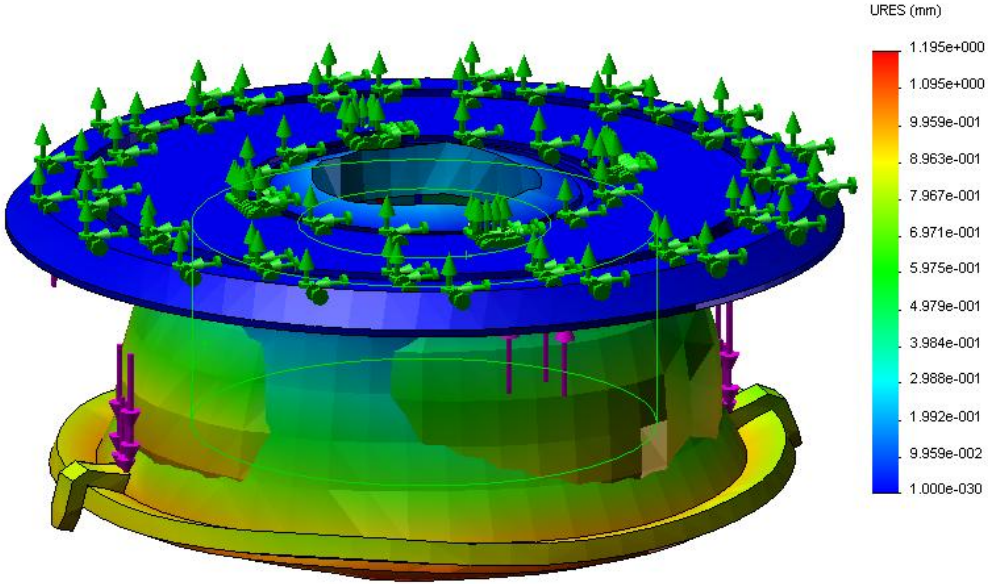
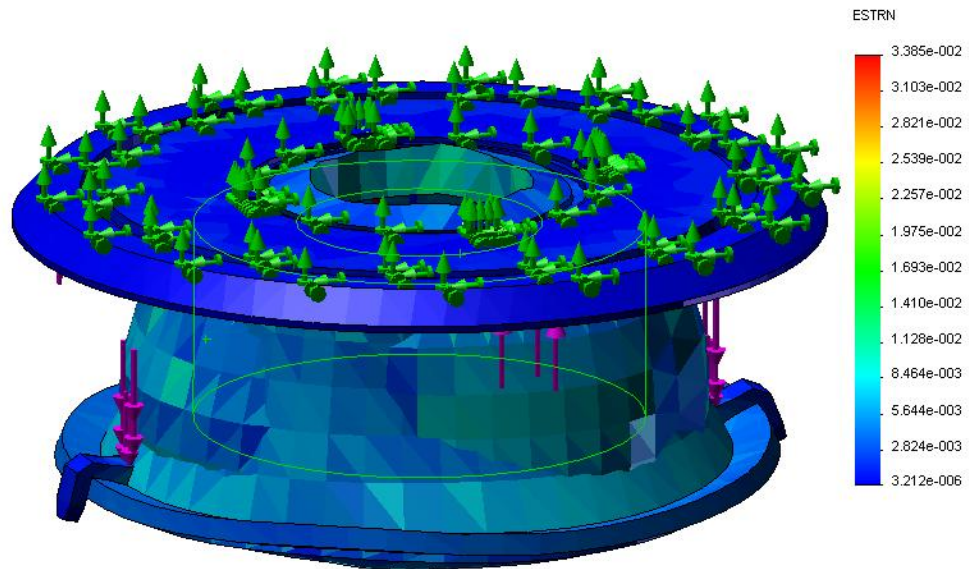
7. Results

7a. Default Results

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises stress	1.14617e+006 N/m^2 Node: 1588	(87.0313 mm, 23 mm, -114.222 mm)	3.36927e+009 N/m^2 Node: 1771	(51.5806 mm, 1.40215e-014 mm, -97.5857 mm)
Displacement1	URES: Resultant displacement	0 mm Node: 218	(-175.239 mm, 23 mm, -101.174 mm)	1.19506 mm Node: 1231	(-103.416 mm, -120 mm, 86.7763 mm)
Strain1	ESTRN: Equivalent strain	3.2122e-006 Element: 2496	(-10.0699 mm, 21.5 mm, 134.469 mm)	0.0338473 Element: 6623	(-140.879 mm, -112 mm, 20.358 mm)

Meia Cam2_V5V2V6-Camara de vazamento superior-Stress-Stress1

JPEG

Meia Cam2_V5V2V6-Camara de vazamento superior-Displacement-Displacement1

JPEG

Meia Cam2_V5V2V6-Camara de vazamento superior-Strain-Strain1
JPEG

Meia Cam2_V5V2V6-Camara de vazamento superior-Design Check-Design Check1
JPEG

8. Appendix

Material name:	AISI 304
Description:	
Material Source:	Library files
Material Library Name:	cosmos materials
Material Model Type:	Linear Elastic Isotropic

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	1.9e+011	N/m^2	Constant
Poisson's ratio	0.29	NA	Constant
Shear modulus	7.5e+010	N/m^2	Constant
Mass density	8000	kg/m^3	Constant
Tensile strength	5.1702e+008	N/m^2	Constant
Yield strength	2.0681e+008	N/m^2	Constant
Thermal expansion coefficient	1.8e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	16	W/(m.K)	Constant
Specific heat	500	J/(kg.K)	Constant

Stress analysis of câmara vazamento inferior_V6

---

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on camara2_V6

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

---

2. File Information

Model name: camara2_V6

Model D:\Bruno\mestrado\Tese\Versão final

location:	6\camara2_V6.SLDPRT
Results location:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Study name:	COSMOSXpress_Study (-Default<As Machined>-)

---

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	camara2_VF4v5V6	AISI 304	26.6511 kg	0.00333139 m^3
2	camara2_VF4v5V6	AISI 304	26.6511 kg	0.00333139 m^3
3	camara2_VF4v5V6	AISI 304	26.6511 kg	0.00333139 m^3
4	camara2_VF4v5V6	AISI 304	26.6511 kg	0.00333139 m^3
5	camara2_VF4v5V6	AISI 304	26.6511 kg	0.00333139 m^3

---

4. Load & Restraint Information

Restraint	
Restraint1 <camara2_V6>	on **1 Face(s)** immovable (no translation).
Description:	

Load	
Temperature-1 <camara2_V6>	on **2 Face(s)** with temperature **1200 Celsius**
Description:	

---

5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Standard
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	14.938 mm
Tolerance:	0.7469 mm
Quality:	High
Number of elements:	14085
Number of nodes:	26573
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:00:49
Computer name:	BRUNO

Solver Information	
Quality:	High
Solver Type:	FFEPlus
Option:	Include Thermal Effects
Thermal Option:	Input Temperature
Thermal Option:	Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin

---

6. Contact

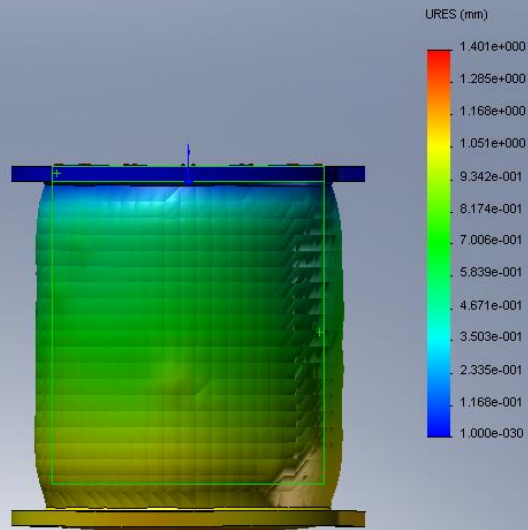
Contact state: Touching faces - Bonded

7. Results

7a. Default Results

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises stress	1.00429e+006 N/m^2 Node: 22366	(170.376 mm, -315 mm, -39.9614 mm)	5.22246e+009 N/m^2 Node: 9940	(-88.5269 mm, -289.286 mm, 101.65 mm)
Displacement1	URES: Resultant displacement	0 mm Node: 336	(1.65327e-014 mm, 15 mm, -135 mm)	1.40129 mm Node: 24191	(-0.0323811 mm, -307.5 mm, -5.03208 mm)
Strain1	ESTRN: Equivalent strain	5.22704e-006 Element: 12006	(-41.5941 mm, -305.163 mm, 15.6663 mm)	0.0184941 Element: 2160	(-88.5269 mm, -289.286 mm, 101.65 mm)

camara2_V6-COSMOSXpress_Study-Stress-Stress1
JPEG

camara2_V6-COSMOSXpress_Study-Displacement-Displacement1
JPEG

camara2_V6-COSMOSXpress_Study-Strain-Strain1
JPEG

---

8. Appendix

Material name: AISI 304

Description:

Material Source: Library files

Material Library Name: cosmos materials

Material Model Type: Linear Elastic Isotropic

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	1.9e+011	N/m^2	Constant

Poisson's ratio	0.29	NA	Constant
Shear modulus	7.5e+010	N/m^2	Constant
Mass density	8000	kg/m^3	Constant
Tensile strength	5.1702e+008	N/m^2	Constant
Yield strength	2.0681e+008	N/m^2	Constant
Thermal expansion coefficient	1.8e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	16	W/(m.K)	Constant
Specific heat	500	J/(kg.K)	Constant

Stress analysis of Estrutura de apoio da câmara de vazamento superior

---

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on Apoio meia câmara 2_V3V6

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

---

2. File Information

Model name:	Apoio meia câmara 2_V3V6

Model location:	D:\Bruno\mestrado\Tese\Versão final 6\Apoio meia câmara 2_V3V6.SLDPRT
Results location:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Study name:	Study 1 (-Default<As Machined>-)

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	Apoio meia câmara 2_V3V6	[SW]AISI 1020	26.8914 kg	0.00340397 m^3

4. Load & Restraint Information

Restraint	
Restraint-1 <Apoio meia câmara 2_V3V6>	on **4 Face(s)** fixed.
Description:	
Restraint-2 <Apoio meia câmara 2_V3V6>	on **4 Face(s)**Hinge
Description:	

Load		
Force-1 <Apoio meia câmara 2_V3V6>	on **3 Face(s)** apply force **-1500 N** normal to reference plane with respect to selected reference **Edge< 1 >** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		

Gravity-1	Gravity with respect to **Edge< 1 >** with gravity acceleration **-9.8 m/s^2** normal to reference plane	Sequential Loading
Description:		

5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Standard
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	15.043 mm
Tolerance:	0.75217 mm
Quality:	High
Number of elements:	11060
Number of nodes:	20987
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:00:16
Computer name:	BRUNO

Solver Information	
Quality:	High
Solver Type:	FFEPlus
Option:	Include Thermal Effects
Thermal Option:	Input Temperature
Thermal Option:	Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin

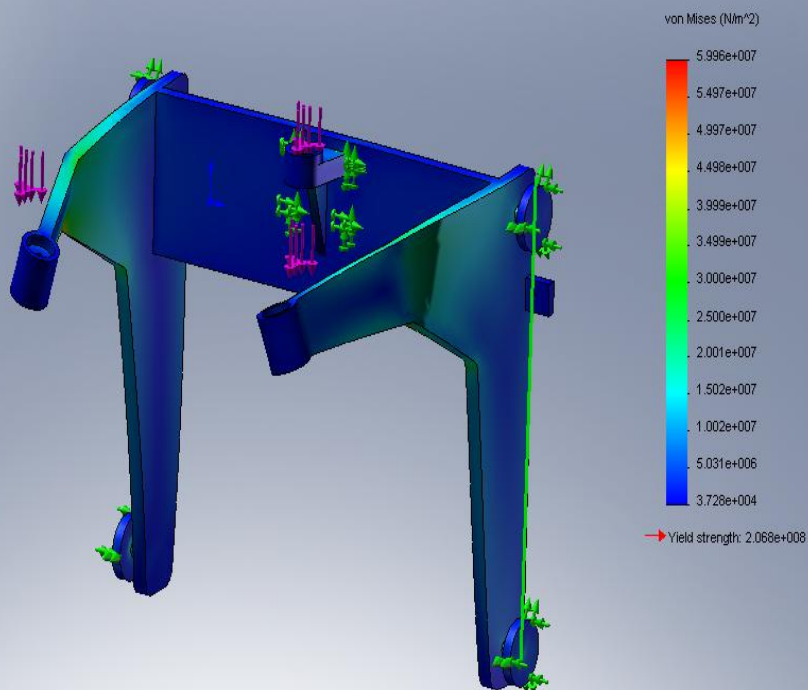
6. Contact

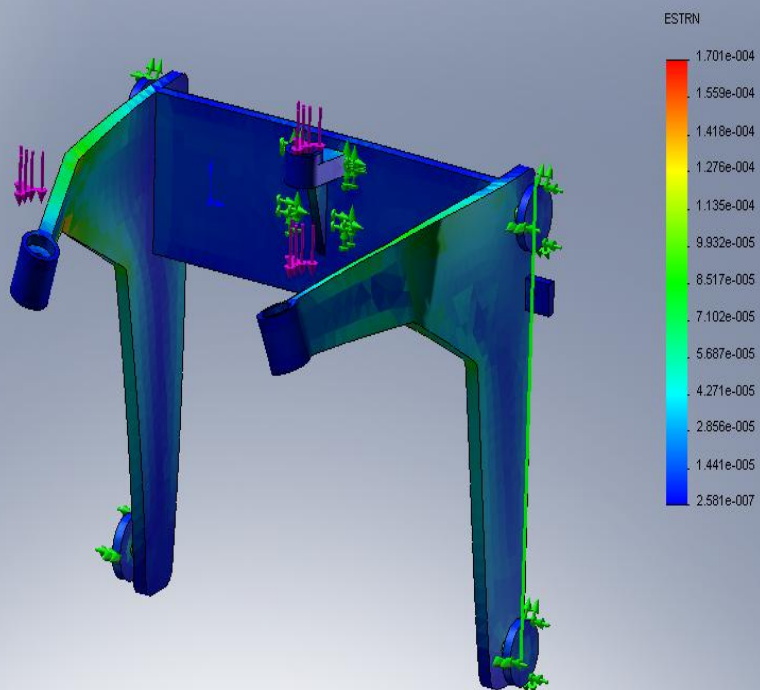
Contact state: Touching faces - Bonded

7. Results

7a. Default Results

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises stress	7.92481e+033 N/m^2 Node: 2009329467	(0 mm, 1.74258e-036 mm, 0 mm)	7.83986e+033 N/m^2 Node: 1980241800	(0 mm, 1.74216e-036 mm, 0 mm)
Displacement1	URES: Resultant displacement	7.92481e+033 mm Node: 2009329467	(0 mm, 1.74258e-036 mm, 0 mm)	7.83986e+033 mm Node: 1980241800	(0 mm, 1.74216e-036 mm, 0 mm)
Strain1	ESTRN: Equivalent strain	7.92481e+033 Element: 2009329467	(0 mm, 1.74258e-036 mm, 0 mm)	7.83986e+033 Element: 1980241800	(0 mm, 1.74216e-036 mm, 0 mm)

Apoio meia câmara 2_V3V6-Study 1-Stress-Stress1
JPEG

Apoio meia câmara 2_V3V6-Study 1-Displacement-Displacement1
JPEG

Apoio meia câmara 2_V3V6-Study 1-Strain-Strain1
JPEG

Apoio meia câmara 2_V3V6-Study 1-Design Check-Design Check1
JPEG

---

8. Appendix

Material name: [SW]AISI 1020

Description:

Material Source: Used SolidWorks material

Material Library Name: solidworks materials

Material Model Type: Linear Elastic Isotropic

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	2e+011	N/m^2	Constant
Poisson's ratio	0.29	NA	Constant
Shear modulus	7.7e+010	N/m^2	Constant
Mass density	7900	kg/m^3	Constant
Tensile strength	4.2051e+008	N/m^2	Constant
Yield strength	3.5157e+008	N/m^2	Constant
Thermal expansion coefficient	1.5e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	47	W/(m.K)	Constant
Specific heat	420	J/(kg.K)	Constant

Stress analysis of Estrutura condensadores V1V6

---

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on Estrutura condensadores V1V6

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

---

2. File Information

Model name:	Estrutura condensadores V1V6

Model location:	D:\Bruno\mestrado\Tese\Versão final 6\Estrutura condensadores V1V6.SLDPRT
Results location:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Study name:	Study 2 (-Default-)

---

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	Estrutura condensadores V1V6	AISI 1020	38.4111 kg	0.00486217 m^3
2	Estrutura condensadores V1V6	AISI 1020	38.4111 kg	0.00486217 m^3
3	Estrutura condensadores V1V6	AISI 1020	38.4111 kg	0.00486217 m^3

---

4. Load & Restraint Information

Restraint		
Restraint-1 <Estrutura condensadores V1V6>	on **2 Face(s)** with respect to reference geometry **Edge< 1 >** with displacement **0 mm** normal to reference plane	Sequential Loading
Description:		
Restraint-2 <Estrutura condensadores V1V6>	on **1 Face(s)** fixed.	
Description:		
Restraint-3 <Estrutura	on **2 Face(s)** with respect to reference geometry **Edge< 1 >** with	Sequential Loading

condensadores V1V6>	displacement **-1e-005 mm** normal to reference plane	
Description:		

Load		
Force-1 <Estrutura condensadores V1V6>	on **2 Face(s)** apply force **-600 N** normal to reference plane with respect to selected reference **Edge< 1 >** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Gravity-1	Gravity with respect to **Edge< 1 >** with gravity acceleration **-9.8 m/s^2** normal to reference plane	Sequential Loading
Description:		
RemoteLoads/Mass-1 <Estrutura condensadores V1V6>	Load (Rigid Connection) on **1 Face(s)** apply force **-300 N** along Y direction at location (0 mm, 70 mm, -300 mm)	Sequential Loading
Description:		

---

5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Standard
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	16.554 mm
Tolerance:	0.82772 mm
Quality:	High
Number of elements:	13730
Number of nodes:	27829
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:01:08
Computer name:	BRUNO

Solver Information	
Quality:	High
Solver Type:	FFEPlus
Option:	Include Thermal Effects
Thermal Option:	Input Temperature
Thermal Option:	Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin

6. Contact

Contact state: Touching faces - Bonded

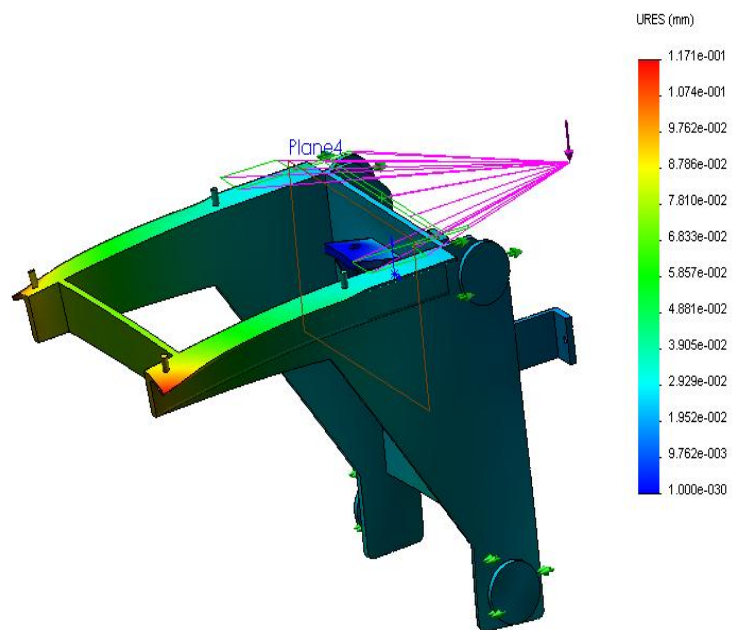
7. Results

7a. Default Results

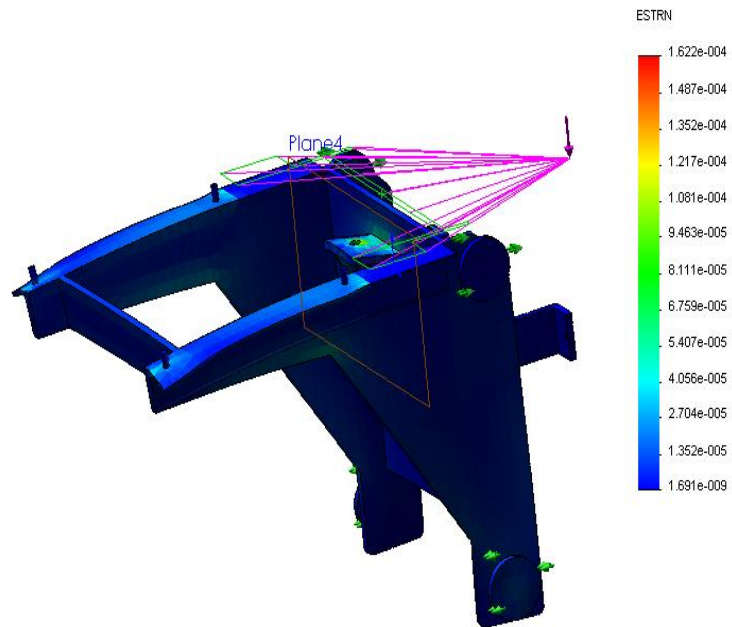
Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises stress	86.3315 N/m^2 Node: 9396	(-230 mm, -30 mm, -162 mm)	3.55266e+007 N/m^2 Node: 22187	(1.38918 mm, 55 mm, 52.1215 mm)
Displacement1	URES: Resultant	86.3315 mm	(-230 mm,	3.55266e+007 mm	(1.38918 mm,

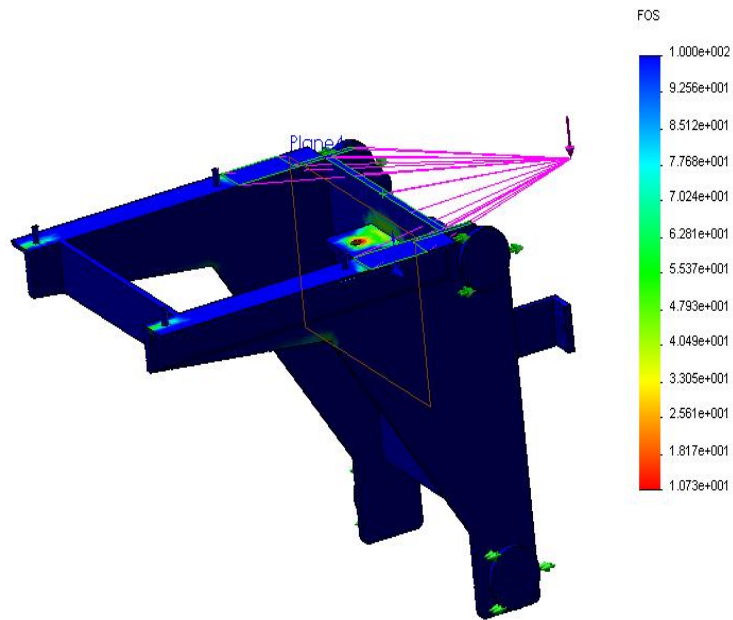
	displacement	Node: 9396	-30 mm, -162 mm)	Node: 22187	55 mm, 52.1215 mm)
Strain1	ESTRN: Equivalent strain	1.14111e-009 Element: 9612	(225.097 mm, -87.7778 mm, -167 mm)	9.03881e-005 Element: 5791	(-6.51905 mm, 57.5 mm, 48.7087 mm)

Estrutura condensadores V1V6-Study 2-Stress-Stress1
JPEG

Estrutura condensadores V1V6-Study 2-Displacement-Displacement1

JPEG

Estrutura condensadores V1V6-Study 2-Strain-Strain1

JPEG

Estrutura condensadores V1V6-Study 2-Design Check-Design Check1
JPEG

---

8. Appendix

Material name:	AISI 1020
Description:	
Material Source:	Library files
Material Library Name:	solidworks materials

Material Model Type: Linear Elastic Isotropic

Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	2e+011	N/m^2	Constant
Poisson's ratio	0.29	NA	Constant
Shear modulus	7.7e+010	N/m^2	Constant
Mass density	7900	kg/m^3	Constant
Tensile strength	4.2051e+008	N/m^2	Constant
Yield strength	3.5157e+008	N/m^2	Constant
Thermal expansion coefficient	1.5e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	47	W/(m.K)	Constant
Specific heat	420	J/(kg.K)	Constant

Stress analysis of Estrutura principal

---

1. Introduction

Summarize the FEM analysis on Estrutura 2V6

Note:

Do not base your design decisions solely on the data presented in this report. Use this information in conjunction with experimental data and practical experience. Field testing is mandatory to validate your final design. COSMOSWorks helps you reduce your time-to-market by reducing but not eliminating field tests.

---

2. File Information

Model name:	Estrutura 2V6
Model location:	D:\Bruno\mestrado\Tese\Versão final 6\Estrutura 2V6.SLDPRT

Results location:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Study name:	Study 1 (-Default-)

---

3. Materials

No.	Part Name	Material	Mass	Volume
1	Estrutura 2V6	AISI 304	245.454 kg	0.0306817 m^3

---

4. Load & Restraint Information

Restraint	
Restraint-1 <Estrutura 2V6>	on **2 Face(s)** fixed.
Description:	

Load		
Force-1 <Estrutura 2V6>	on **1 Face(s)** apply normal force **3000 N** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Force-2 <Estrutura 2V6>	on **1 Face(s)** apply normal force **1000 N** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Force-3 <Estrutura 2V6>	on **1 Face(s)** apply normal force **1 N** using uniform distribution	Sequential Loading
Description:		
Gravity-1	Gravity with respect to **Edge< 1 >** with gravity acceleration **-9.8 m/s^2** normal to reference plane	Sequential Loading
Description:		

5. Study Property

Mesh Information	
Mesh Type:	Solid mesh
Mesher Used:	Standard
Automatic Transition:	Off
Smooth Surface:	On
Jacobian Check:	4 Points
Element Size:	31.31 mm
Tolerance:	1.5655 mm
Quality:	High
Number of elements:	52121
Number of nodes:	100350
Time to complete mesh(hh;mm;ss):	00:04:31
Computer name:	BRUNO

Solver Information	
Quality:	High
Solver Type:	FFEPlus
Option:	Include Thermal Effects
Thermal Option:	Input Temperature
Thermal Option:	Reference Temperature at zero strain: 298 Kelvin

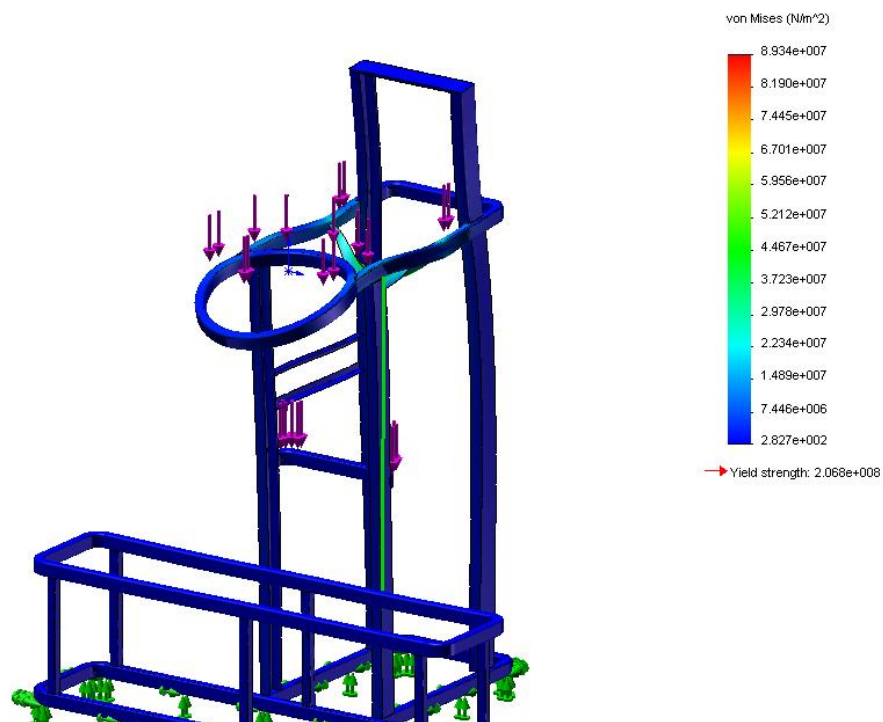
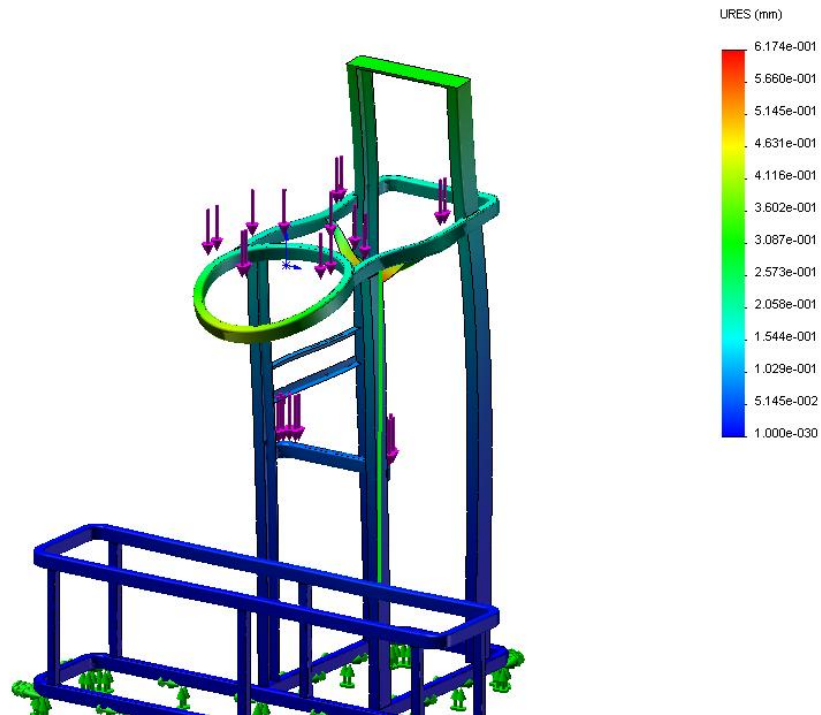
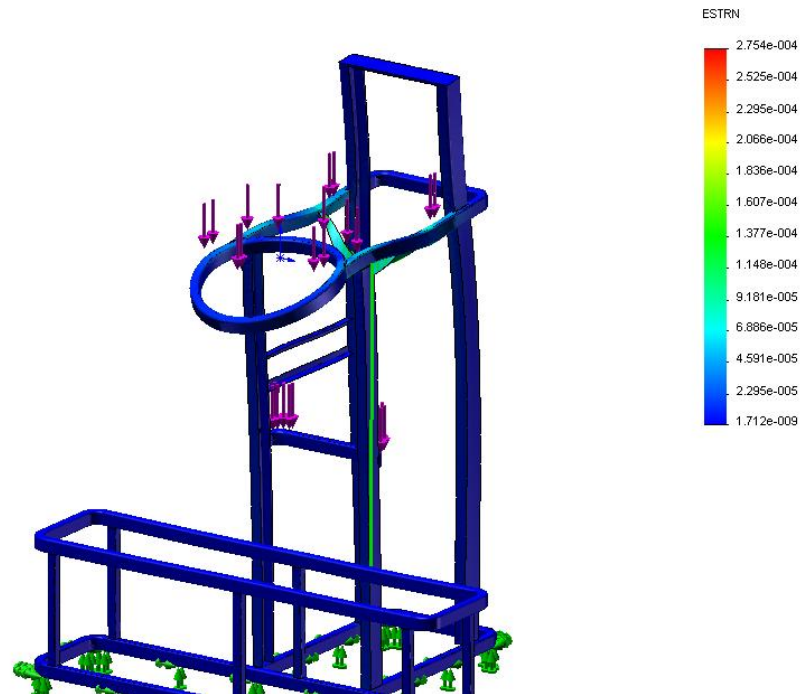
6. Contact

Contact state: Touching faces - Bonded

7. Results

7a. Default Results

Name	Type	Min	Location	Max	Location
Stress1	VON: von Mises stress	282.657 N/m^2 Node: 67180	(-46.7308 mm, -1890 mm, -1175 mm)	8.93438e+007 N/m^2 Node: 87114	(245 mm, -19.6194 mm, -735.587 mm)
Displacement1	URES: Resultant displacement	0 mm Node: 2168	(-274.5 mm, -1890 mm, -235 mm)	0.617413 mm Node: 9858	(2.22045e-013 mm, 20 mm, -707.5 mm)
Strain1	ESTRN: Equivalent strain	1.71198e-009 Element: 11524	(875.149 mm, -1889.3 mm, -102.964 mm)	0.000275432 Element: 6649	(237.344 mm, -18.4542 mm, -736.587 mm)

Estrutura 2V6-Study 1-Stress-Stress1
JPEG

Estrutura 2V6-Study 1-Displacement-Displacement1
JPEG

Estrutura 2V6-Study 1-Strain-Strain1
JPEG

Estrutura 2V6-Study 1-Design Check-Design Check1
JPEG

---

8. Appendix

Material name: AISI 304

Description:

Material Source: Library files

Material Library Name: cosmos materials

Material Model Type: Linear Elastic Isotropic

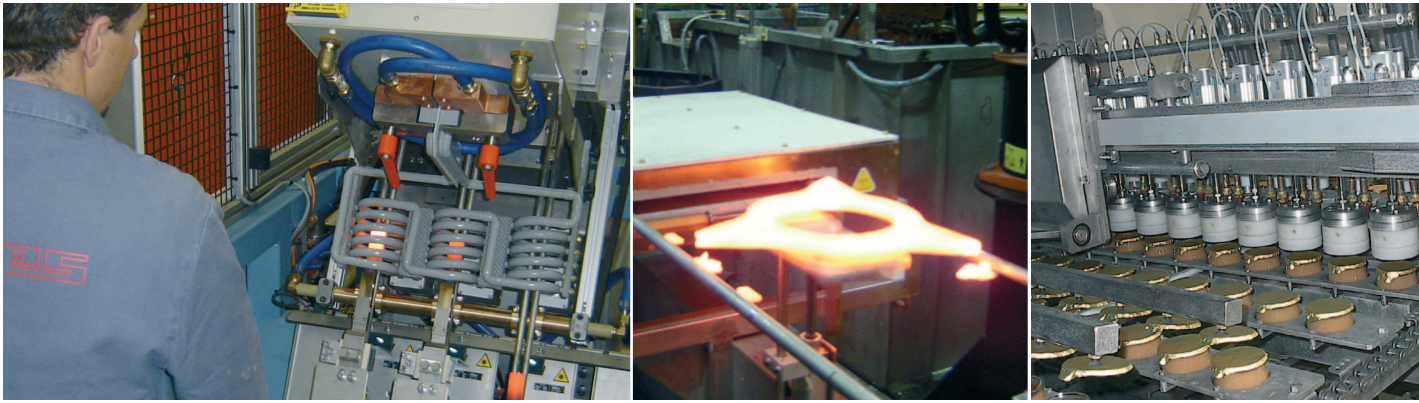
Property Name	Value	Units	Value Type
Elastic modulus	1.9e+011	N/m^2	Constant
Poisson's ratio	0.29	NA	Constant

Shear modulus	7.5e+010	N/m^2	Constant
Mass density	8000	kg/m^3	Constant
Tensile strength	5.1702e+008	N/m^2	Constant
Yield strength	2.0681e+008	N/m^2	Constant
Thermal expansion coefficient	1.8e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	16	W/(m.K)	Constant
Specific heat	500	J/(kg.K)	Constant

ANEXO D

FOLHAS DE CARACTERISTICAS TÉCNICAS

M.O.S. TRANSISTORS GENERATORS

75 AND 100 kW COMPACT

M.O.S. TRANSISTORS GENERATORS

75 AND 100 kW COMPACT

DESCRIPTION

The MOS transistor inverter is a 10 to 1000 kHz frequency converter. It acts as a current generator supplying a parallel resonant circuit. It includes:

- **a section circuit breaker on the front side**
- **a MOS transistor chopper allowing adjusting the output power**
- **a filtering stage against the HF return towards the mains**
- **a smoothing choke**
- **a H-shaped inverter bridge with MOS transistors**
- **an upstream HF transformer**
- **the switching assistance and control electronics**
- **an air and pure water circulation cooling circuit**

The control-supervision unit is located on the front side of the cabinet. It includes:

- a dialog terminal allowing resetting, starting and stopping the generator, increasing and decreasing the set point. This terminal includes on one hand the display of the analog values (voltage, frequency, current, power), and on the other hand the operation signals (mains on, auxiliary devices on, HF requests, failures). It also includes a timer function as well as the local/remote control selection, defining if the on/off instructions are to be given on the control panel or input from a remote control device.

- an emergency stop pushbutton

- a general failure signal lamp

Control by means of an insulated external 4/20 mA set point.
4/20 mA outputs (current, voltage, power).
Frequency output by means of transistors, from 3.5 V to 28.8 V.

MAIN ADVANTAGES

- High output efficiency greater than 90 %.
- High versatility thanks to the use of proven semi-conductor technology.
- Compact unit.
- Rapid start-up.
- Practically maintenance-free.
- Easy to use.

FIELDS OF APPLICATION

Induction heating for:

- Heat treatment (tempering, annealing...)
- Surface treatment
- Fusion of metals
- Heat sealing of aluminium
- Welding of metals
- Industrial physics (drawing of optical fibers, vacuum furnaces).

Note: *The power delivered by the generator depends on the load. It reaches its maximum when the load impedance is equal to the generator output impedance.*

TECHNICAL DATA SHEET

GENERATOR TYPE		LOW FREQUENCY		MEDIUM FREQ.		HIGH FREQ.		VERY HIGH FR.
GTM		**75/50**	**100/50**	**75/100**	**100/100**	**75/400**	**100/400**	**50/1000**

LOAD CHARACTERISTICS								
Rated output power	kW	75	100	75	100	75	100	50
Power adjustment	kW	10 to 100% of nominal power						
Maximal HF frequency	kHz	50	50	100	100	400	400	1000
Minimal HF frequency	kHz	10	10	30	30	100	100	250
Rated load impedance	ohm	2,14	1,6	2,14	1,6	2,14	1,6	3,2
Load impedance tolerance limits		+20% and -18%						

SUPPLY								
Voltage	V	400/480						
Phase		3						
Voltage fluctuation		+/-10%						
Frequency	Hz	50 to 60						
Minimum COS PHI at rated output power		0,92						
Connected power	kVA	109	145	109	145	109	145	73

ENCLOSURE		
Type		in enclosure
Colour		RAL Grey 7035
Protection class		IP 55
Height		2100
Width		600
Depth		800
Weight		400

COOLING*		
Type		Water circulation
Generator minimum water flow rate	l/mm	36
Maximum inlet pressure	bar	7,5
Minimal pressure difference	bar	3,5
Water inlet temperature	°C	18 to 35
Resistivity	ohm cm^2/cm	2000 to 10 000
Water quality		Optically clear without sediment Concentration less than 5 mgr/l
Water PH		7 to 8,5
Pipe connection		1"

*Heating station, capacitors, inductor not included

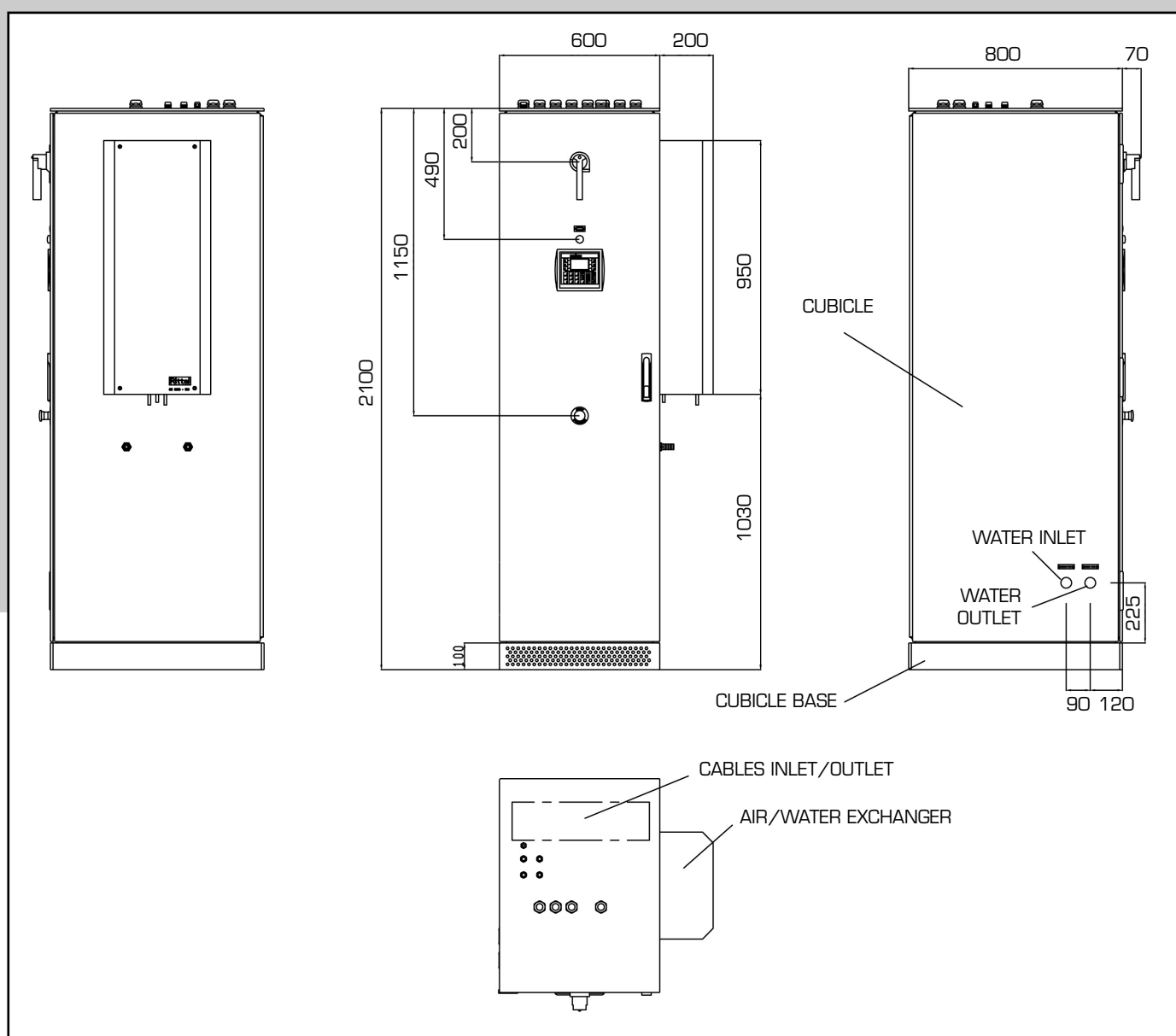
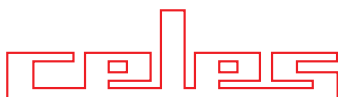
NB:

Our permanent development efforts may lead us to modify this technical data without previous notice.

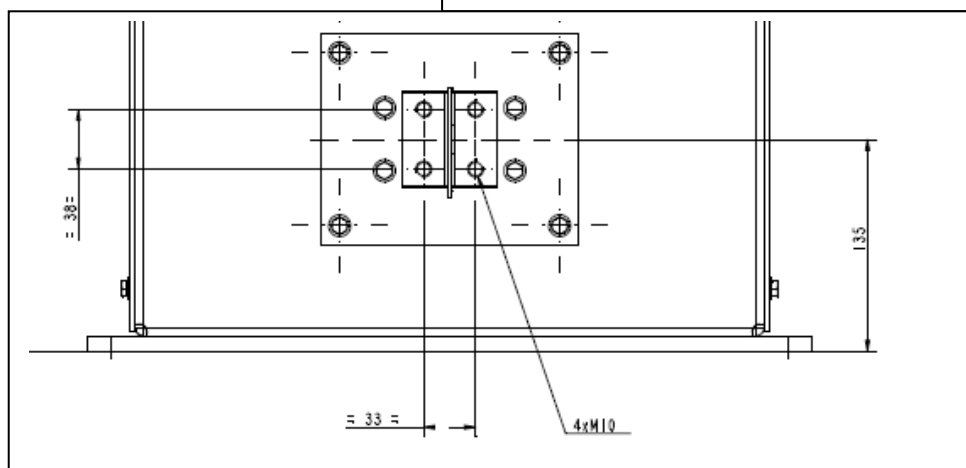
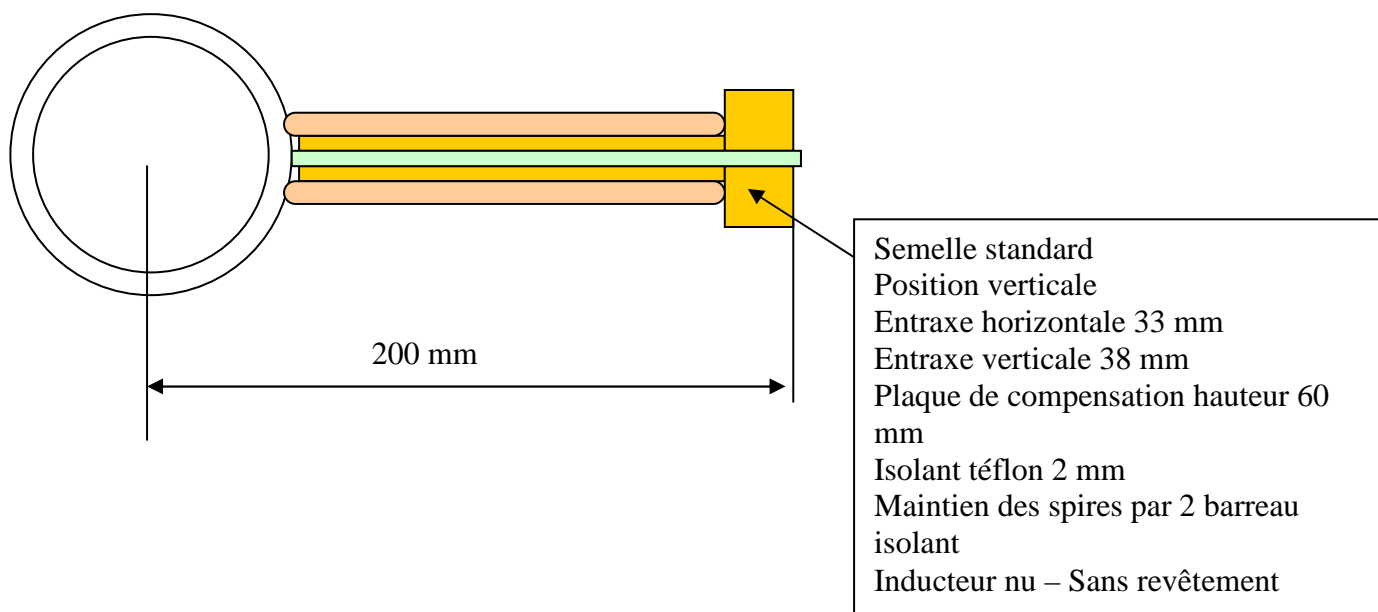
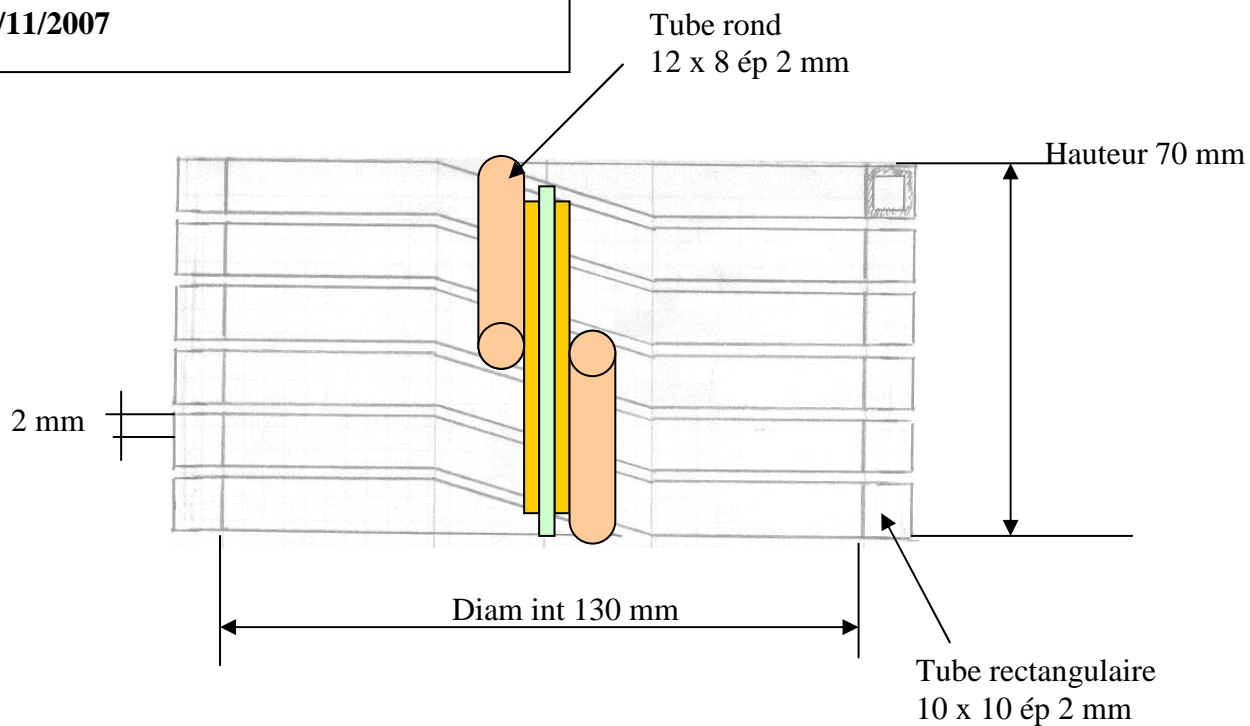
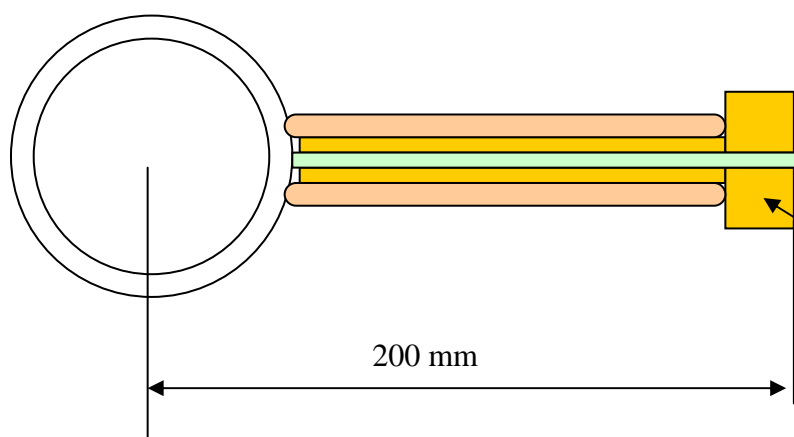
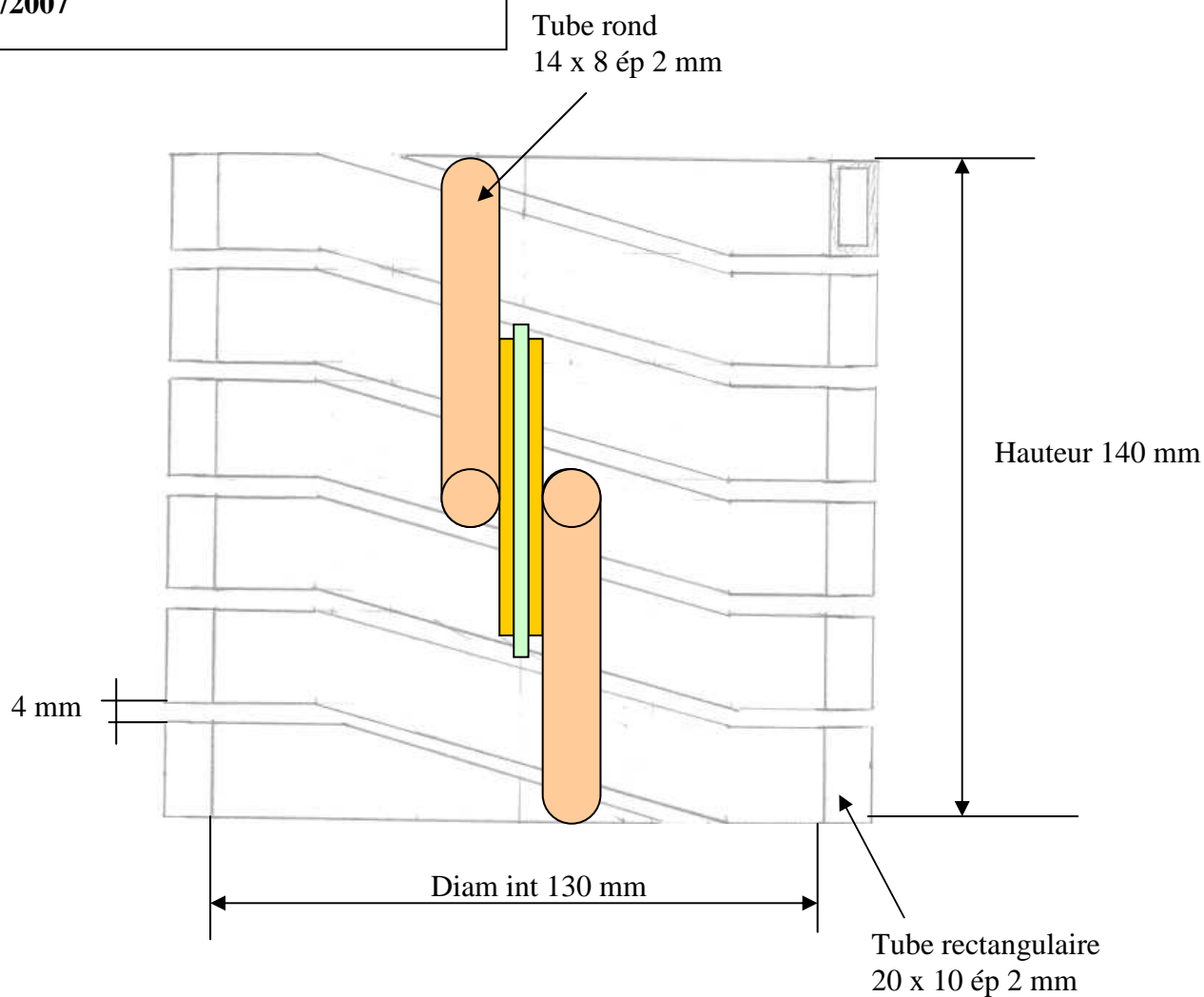
OPTIONS

- Mains transformer in external housing
- Power supply in 3 x 230 V or 3 x 480 V
- Tropicalized equipment
- Internal over pressure
- Other colors
- Pure water cooling unit
- Temperatur regulator
- Mains isolating falt detector

DIMENSIONS

600 200
800 70
200
490
1150
2100
950
1030
100
CUBICLE
WATER INLET
WATER
OUTLET
225
CUBICLE BASE
90 120
CABLES INLET/OUTLET
AIR/WATER EXCHANGER

(subject to modification)

B.P. 5 - 68610 LAUTENBACH - FRANCE
TEL. : +33 (0)3 89 74 55 00
FAX : +33 (0)3 89 76 36 79
WEB : www.celes.fr - E-MAIL : mail@celes.fr

REF. AOUT 2006 V1 MW CREATION +33(0)3 89 44 84 95

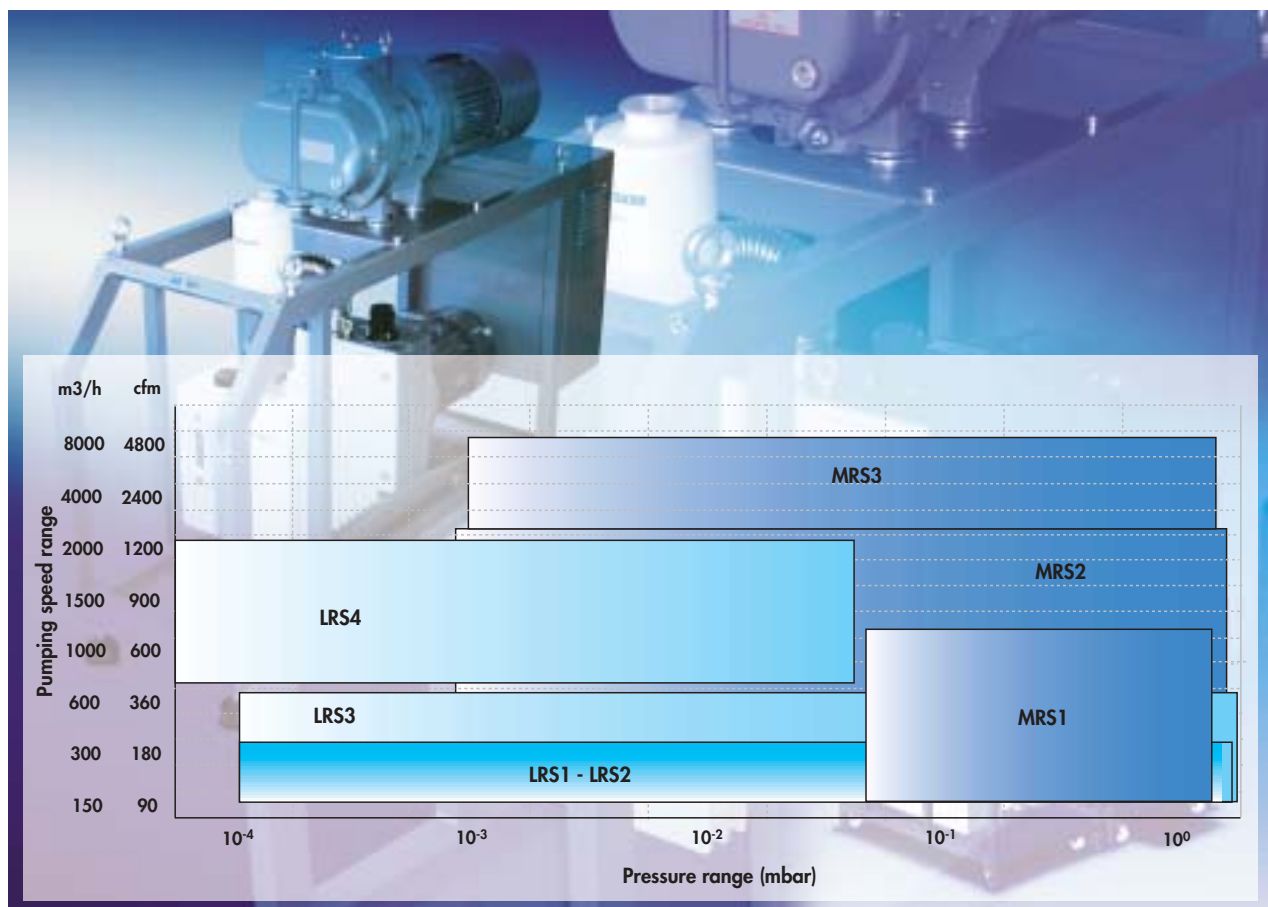
INEGI 07455J01
Inducteur hauteur 70 mm Diamètre 130 mm
N° série I8109
Le 30/11/2007
Tube rond
12 x 8 ép 2 mm
Hauteur 70 mm
2 mm
Diam int 130 mm
Tube rectangulaire
10 x 10 ép 2 mm
200 mm
Semelle standard
Position verticale
Entraxe horizontale 33 mm
Entraxe verticale 38 mm
Plaque de compensation hauteur 60 mm
Isolant téflon 2 mm
Maintien des spires par 2 barreau isolant
Inducteur nu – Sans revêtement
38
135
33
4xM10

INEGI 07455J01
Inducteur hauteur 140 mm Diamètre 130 mm
N° série I8108
Le 30/11/2007
Tube rond
14 x 8 ép 2 mm
Hauteur 140 mm
4 mm
Diam int 130 mm
Tube rectangulaire
20 x 10 ép 2 mm
200 mm
Semelle standard
Position verticale
Entraxe horizontale 33 mm
Entraxe verticale 38 mm
Plaque de compensation hauteur 60 mm
Isolant téflon 2 mm
Maintien des spires par 2 barreau isolant
Inducteur nu – sans aucun revêtement
= 38 =
135
= 33 =
4xM10

1/2"gaz
150
DANGER
DE
BRULURE
260
38
135
33
4xM10
407
12x PG29
3x PG13
60
50
323
ENTREE D'EAU
SORTIE D'EAU
Epaisseur : 10
80
75
90
600
16,5
4xØ11
460
430
(150)
300
D | 3xPG16 devient 3xPG13 | 25/07/06 | SCHMIDLIN
C | Mise à jour | 21/03/05 | SCHMIDLIN
B | Adjonction plaquette "Danger de brulure" | 16/02/05 | SCHMIDLIN
E | Sup. rond. év. - Adj. rond. plate | 13/12/06 | SCHMIDLIN
Ind | Modification/Änderung | Date/Datum | Nom/Name
TRAITEMENT/Treatment/Behandlung
POIDS/Weight/Gewicht
81,272 Kg
NOM/Name
SCHMIDLIN
VERIFIE/Checked/Geprüft
D. STUDER
APPROUVE/Approved/Zustimmung
P. ROEHR
DATE/Datum
16-Feb-05
FORMAT/Size
A0
ECHELLE/Scale/Maßstab
1:2
Coffret ALU. 600 - 2x8 2,4 µF
STANDARD
ST00073_ENC
E
68610 LAUTENBACH - FRANCE
Ce plan est notre propriété exclusive et ne peut être reproduit ou communiqué sans notre autorisation écrite
This document is private and confidential and must not be copied or disclosed to a third party without CELES's consent
Diese Zeichnung ist unser exklusives Eigentum und kann nicht ohne unsere schriftliche Genehmigung kopiert oder mitgeteilt sein
FEUILLE 1/1

ROOTS PUMPING SYSTEMS

From products to pumping solutions

In order to meet the requirements of a wide range of applications, Alcatel has developed a comprehensive range of pumping packages based on the combination of vacuum Roots blowers and lubricated roughing pumps.

Pressure range : 10^{-3} mbar to 10^{-5} mbar
From the most simple LRS1 to the most powerfull LRS4, these solutions offer optimized pumping capacity and high reliability for high performance applications.

Pressure range : 10^{-1} mbar to 10^{-3} mbar
MRS configurations offer high pumping speed and cost effective design along with modularity for easy integration.

LRS 3

Designed for reliability, performance, easy maintenance

The 150/300/600 Roots pumps are combined with a two-stage Pascal Rotary Vane Pumps in a robust frame that can accomodate several options.

Technical data

		Units	RSV 151 + RVP 2033 RSV 151 B + RVP 2033	RSV 301 + RVP 2033 RSV 301 B + RVP 2033	RSV 601 + RVP 2033 RSV 601 B + RVP 2033
Pumping speed		m^3/h	150/180	300/360	600/720
(swept volume)	**50/60 Hz**	cfm	89/106	177/212	354/424
Pumping speed		m^3/h	120/140	240/290	330/415
at 1 mbar	**50/60 Hz**	cfm	70/82	141/170	194/244
Max. ultimate total pressure		mbar	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Max. continuous inlet pressure		mbar	30 (RSV151) 1000 (RSV151B)	15 (RSV301) 1000 (RSV301B)	10 (RSV601) 1000 (RSV601B)
Inlet flange		ISO-DN	63	63	100
Outlet flange		ISO-DN	40	40	40
Power requirement		KW	1,85/2,05	2,2/2,4	2,6/2,8
Voltage	**50/60 Hz**	Volt		3 phase 180/250 - 360/480	
Oil capacity		liter	4	4,3	4,3
Oil type		type		A120 or A113 with C2 pump	
Dimensions	**L**	mm (inch)	1020 or 1320 with elec.box	1020 or 1320 with elec.box	1020 or 1320 with elec.box
	W	mm (inch)	400 or 600 with DE filter	400 or 600 with DE filter	400 or 600 with DE filter
	H	mm (inch)	1020	1090	1090
Weight		kg/lb	161 (354,2)*	187 (411,4)*	206 (453,2)*

		Units	RSV 301 + RVP 2063 RSV 301 B + RVP 2063	RSV 601 + RVP 2063 RSV 601 B + RVP 2063
Pumping speed		m^3/h	300/360	600/720
(swept volume)	**50/60 Hz**	cfm	177/212	354/424
Pumping speed		m^3/h	265/320	400/490
at 1 mbar	**50/60 Hz**	cfm	156/188	235/288
Max. ultimate total pressure		mbar	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Max. continuous inlet pressure		mbar	15 (RSV301) 1000 (RSV301B)	10 (RSV601) 1000 (RSV601B)
Inlet flange		ISO-DN	63	100
Outlet flange		ISO-DN	40	40
Power requirement		KW	3,3/3,7	3,7/4,1
Voltage	**50/60 Hz**	Volt	3 phase 180/250 - 360/480	
Oil capacity		liter	7,7	7,7
Oil type		type	A120 or A113 with C2 pump	
Dimensions	**L**	mm (inch)	1020 or 1320 with elec.box	1020 or 1320 with elec.box
	W	mm (inch)	400 or 600 with DE filter	400 or 600 with DE filter
	H	mm (inch)	1090	1090
Weight		kg/lb	219 (481,8)*	238 (523,6)*

* Add 40 kg (88 lb) for option elec.box.
* Add 12 kg (24,6 lb) for option DE1.
* Add 17 kg (37,4 lb) for option DE2.

CHINA
Alcatel Vacuum Technology Shanghai
Tel: (86) 21 5027 0628
Fax: (86) 21 3895 3815

FRANCE
Alcatel Vacuum Technology France
Tel: 33 (0) 4 50 65 77 77
Fax: 33 (0) 4 50 65 77 89

GERMANY
Alcatel Hochvakuum Technik GmbH
Tel: (49) 9342 96 10 0
Fax: (49) 9342 96 10 30

ITALY
Alcatel Vacuum Systems S.p.a.
Tel: (39) 039 686 3855
Fax: (39) 039 667 125

JAPAN
Alcatel Japan
Tel: (81) 44 797 5920
Fax: (81) 44 797 5932

KOREA
Alcatel Vacuum Technology Korea
Tel: (82) 2 409 6277
Fax: (82) 2 409 6279

NETHERLANDS
Alcatel Vacuum Technology Netherlands
Tel: (31) 306 35 13 60
Fax: (31) 306 35 12 21

SINGAPORE
Alcatel Singapore Pte Ltd
Tel: (65) 6254 0828
Fax: (65) 6254 7018

TAIWAN
Alcatel Vacuum Technology Taiwan
Tel: (886) 3 5599 230
Fax: (886) 3 5599 231

UNITED KINGDOM
Alcatel Vacuum Technology (U.K.)
Tel: (44) 1 506 418 000
Fax: (44) 1 506 418 002

USA
Alcatel Vacuum Products
Tel: (1) 781 331 4200
Fax: (1) 781 331 4230

Alcatel Vacuum Technology

98 Avenue de Brogny - BP 2069 - 74009 Annecy Cedex - France - Tel.: 33 (0) 4 50 65 77 77 - Fax: 33 (0) 4 50 65 77 89

www.adixen.com

Part Number: 791579 - April 2006 - All information can be modified without prior notice - Realization:

Vacuum Transducer - Corrosive Gas Version

Absolute Pressure 1400 - 1 mbar (Torr) VSC42C

The Piezo transducer VSC42C can be used for measuring absolute pressure in chemical process engineering and rough industrial applications.

The ceramic sensor and the glass fibre reinforced teflon hose connection makes it resistive against aggressive gases and chemicals.

Signal output:
4 - 20 mA (two wire).

Typical Applications

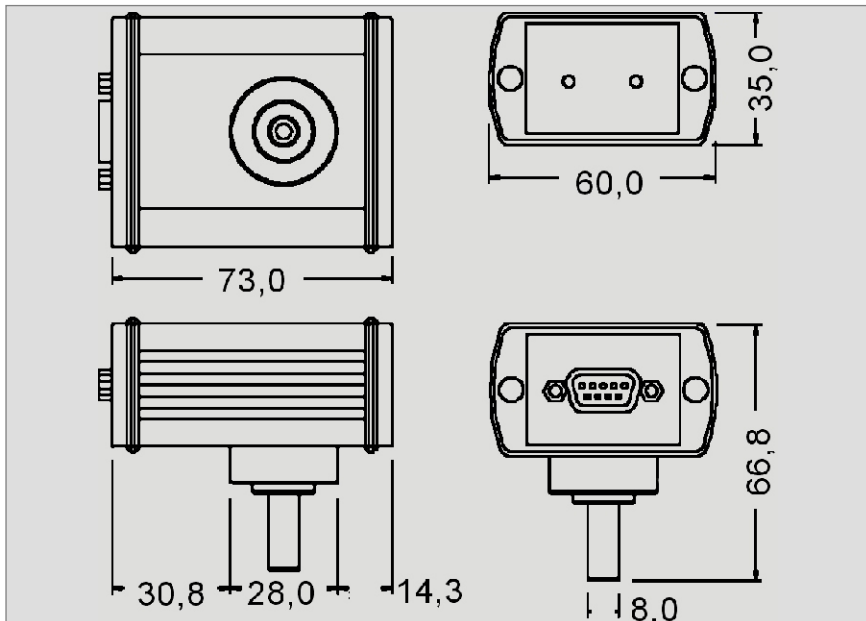
- Vacuum measuring in rough environment
- Chemical process engineering
- Corrosive gas applications
- Plant construction
- Medical technology
- Laboratory

Your Benefits

- Chemically resistent ceramic measuring cell with PTFE connection
- High reliability and long term stability
- Resistent against soiling
- Reaction time 10 ms
- Suitable for corrosive gases and solvent vapour
- Temperature compensated
- Easy readjustment of atmosphere and zero pressure
- Standard signal output 4 - 20 mA (two wire), linear
- Easy connection with PLCs and other system control
- Designed for rough industrial environment
- Rubust metal housing with protection class IP54
- Vacuum connection over a 8 mm hose nozzle

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

Vacuum Transducer - Corrosive Gas Version

Absolute Pressure 1400 - 1 mbar (Torr) VSC42C

Technical Data

Measuring Principle	Piezoresistive
Materials in Contact with Vacuum	Al_2O_3-ceramic, PTFE, Kalrez
Measuring Range	1400 - 1 mbar (1050 - 1 Torr) Admitted overload 4 bar abs.
Accuracy	± 0,4 % from scale
Operating Temperature	5 ... 50°C
Storage Temperature	-20 ... +70°C
Power Supply	9 - 30 VDC with 50 Ohm loop resistance 19 - 30 VDC with 500 Ohm loop resistance
Power Consumption	Approx. 30 mA
Output Signal	4 - 20 mA, two wire (linear, 20 mA / 1400 mbar)
Max. Loop Resistance	R_L = (supply voltage- 7,5V) / 20mA
Electrical Connection	SubD, 9pol, female
Vacuum Connection	Hose nozzle PTFE, 8mm
Adjustment	Potis for zero point and atmosphere
Weight	160 g

Article Numbers

VSC42CA4
Piezo transducer 1400 - 1 mbar with PTFE hose nozzle output 4 - 20mA (two wire)

Accessories:

W0900002
Measuring cable, shielded, 2 m

W0900006
Measuring cable, shielded, 6 m

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

Smartline ™ Vacuum Display and Control Unit

Absolute Pressure 1400 - $1x10^{-9}$ mbar (Torr) VD9

Intelligent control unit for your application in apparatus and plant engineering or specialty machinery.

Two relay switches, one joint or two independent setpoints.

Compact metal 19inch cassette 14TE x 3HE.

A frontfoil protects the instrument from splashing water, soiling can easily be removed.

Typical Applications

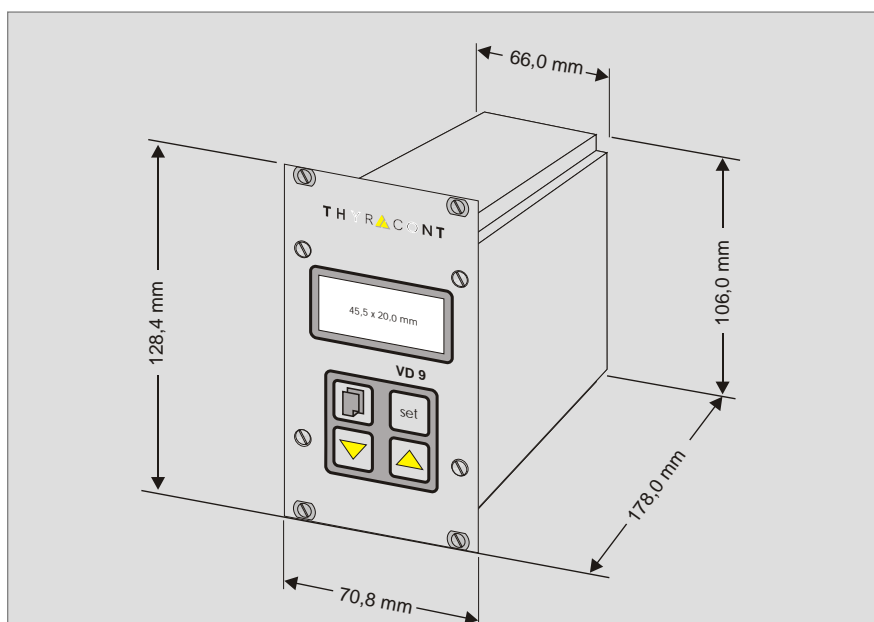
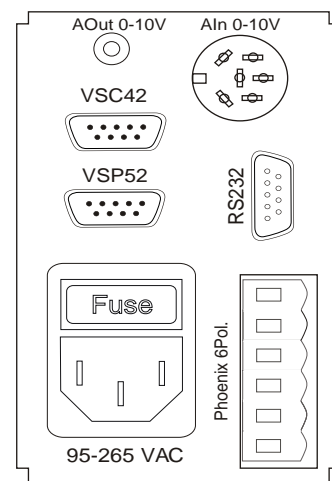
- Industrial plant engineering
- Process automation
- Apparatus engineering, e. g. process control and documentation for quality assurance
- Centralized vacuum supply
- Chemical process engineering, e.g. vacuum mixers
- Specialty machinery
- Packing technology

Your Benefits

- On-off or three-position control, optionally with PI-characteristic, analog outputsignal for continuous PI-control available
- 2 relay switches
- Shielded 19" metal cassette with foil-protected front panel
- Worldwide use by switched mode power supply 95 - 265 VAC
- Pressure display in mbar, Torr, hPa
- The controller will be configured ex works according to your specified demands
- Versions made to specification on request (e.g. setpoint adjustment by external 4-20mA signal)
- 1-channel-controller, can be combined with 2 transducers for covering a wider range (e.g. 1400-0,001mbar) generating *one* continuous pressure display
- Simple operation
- High-contrast LCD display with background illumination
- Supports programming of setpoints via serial interface RS232
- VacuGraph-software: documentation and evaluation of vacuum processes, programming setpoints and time based pressure profiles, remote control

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

Smartline ™ Vacuum Display and Control Unit

Absolute Pressure 1400 - 1x10⁻⁹ mbar (Torr) *VD9*

Pin configuration (back side)

Technical Data

Measurement Range	1400-1.0e-9mbar depending on transducer type for max. 2 transducers
Measurement Display	floating point: 2 - 4 digits exponential, 2 dig. mantissa, 1dig. exponent
Accuracy	depending on the transducer type, additionally 0.06% f.s. +/- 1 digit
Measuring Rate	50 ms
Operating Temperature	5 … 50°C
Storage Temperature	-20 … +60°C
Power Supply	95 - 265 VAC 50/60 Hz
Power Consumption	max. 15 W incl. transducer
Transducer Power Supply	24 VDC, 8 W
Measuring Inputs	SubD 9pol., female - 4-20 mA 1400 - 1 mbar VSC42MA4 - 4-20 mA (1000...) 20-0,001 mbar VSP52MA4 - 0-10 V signal input (Amphenol)
Control Outputs	2 relays, analog output 0-10V
Switching Current	2 A, 250 VAC
Display	alphanumeric LCD display, background illumination, 4 digits 45 x 20 mm
Weight	775 g

Article Numbers

▷ **VD9S2**
19 inch-cassette 14 TE x 3 HE,
RS232, analog output, 95-265 VAC

Complete Sets

▷ **VD92P (1400 - 1 mbar)**
VD9S2 + VSC42MA4 + cable 2 m

▷ **VD94P (1000...20 - 0,001 mbar)**
VD9S2 + VSP52MA4 + cable 2 m

▷ **VD95P (1400 - 0,001 mbar)**
VD9S2 + VSC42MA4 + VSP52MA4 +
2 cable 2 m

▷ **VD96P (1000...20 - 1e-4 mbar)**
VD9S2 + VSP62MV + cable 2 m

▷ **VD97P (1000...20 - 5e-9 mbar)**
VD9S2 + VSM72MV + cable 2 m

▷ **VD98P (1000...20 - 1e-9 mbar)**
VD9S2 + VSH82MV + cable 2 m

Accessories

▷ **W0800002**
Interface cable, sheelded, 2 m

▷ **VGR**
VacuGraph Windows Software

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

Vacuum Transducer

Absolute Pressure 1000 - 0.001 mbar (Torr) *VSP52M*

The Pirani transducer can be used for measuring absolute pressure in the fine vacuum range.

Some of its remarkable features are the minimized sensor volume(< 1ccm) as well as its excellent repeatability.

The temperature compensated transducer is available in several versions with 0 - 1 V and 4 - 20 mA signal output.

Typical Applications

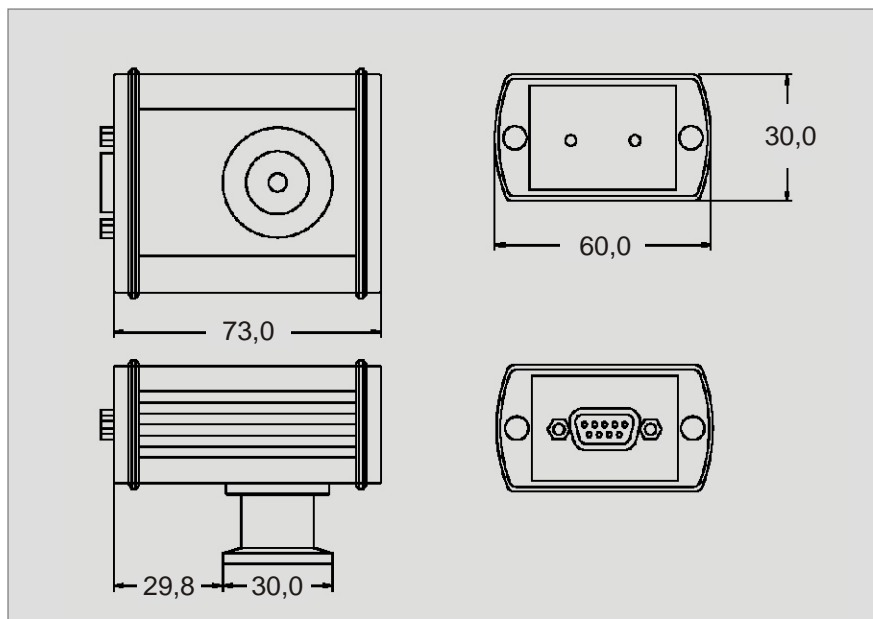
- Analysis instruments
- Operation control at vacuum plants and pumps
- Vacuum drying
- Freeye drying
- Appliance engineering
- Process engineering
- Vacuum furnaces

Your Benefits

- Quick reaction on pressure changes
- Stable measurements due to temperature compensation
- Excellent reproducability
- High reliability
- Economical Pirani measuring principle
- Metal sealed sensor
- Durable sensor, elastic helix filament
- Easy readjustment of atmosphere and zero pressure
- Standardized output signal (voltage or current)
- Easy connection with PLCs and other system control
- Designed for industrial applications
- Robust metal housing with protection class IP54
- Vacuum connection over a stainless steal small flange DN16KF

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

Vacuum Transducer

Absolute Pressure 1000 - 0.001 mbar (Torr) VSP52M

Technical Data

Measuring Principle	Pirani, depending on gas type
Materials in Contact with Vacuum	Stainless steel, tungsten, nickel
Measuring Range	1000...20 - 0,001 mbar (1000 - 0,001 Torr) admitted overload: 4 bar abs.
Accuracy	depending on range 1000 - 100 mbar: tendency 100 - 10 mbar: < 30 % from reading 10 - 0.01 mbar: ca. 10 % from reading < 0,01 mbar: < factor 2
Operating Temperture	10 ... 40°C
Storage Temperature	-20 ... +70°C
Power Supply	8-16 VDC, 16-30 VDC with ext. resistor (accessories)
Power Consumption	Approx. 50 mA
Output Signal	VSP52MV1: 0 - 1 V VSP52MA4: 4 - 20 mA (non linear, according characteristic) Max. load 180W/ 8VDC, 280W/ 15VDC
Electrical Connection	SubD, 9pol, female
Vacuum Connection	DN 16 KF, stainless steel
Justification	Potis for zero pressure and atmosphere
Weight	180 g

Article Numbers

VSP52MA4
Pirani transducer 1000 - 0.001 mbar
with DN16 KF connection;
output 4 - 20 mA

VSP52MV1
Pirani transducer 1000 - 0.001 mbar
with DN16 KF connection;
putput 0 - 1 V

Accessories

W0900002
lMeasuring cable, shielded, 2 m

W0900006
Measuring cable, shielded, 6 m

R270RM5EN
External resistor for power supply
16-30VDC

Thyracont Vacuum Instruments GmbH
Max-Emanuel-Str. 10, D-94036 Passau
Phone: ++49/(0)851/95986-0; Fax: ++49/(0)851/95986-40
Internet: www.thyracont.com; E-Mail: info@thyracont.de

GENERAL CHARACTERISTICS

Mechanical Flow Switch for liquids or gaseous media with spring supported piston and magnetic actuation of a reed switch. Robust design, produced in materials brass or stainless steel.

* good repeatabilty
* dirt-resistance
* high switch capability
* hermetic separation of mechanical and electrical component
* exact setting of switch via scale + gear

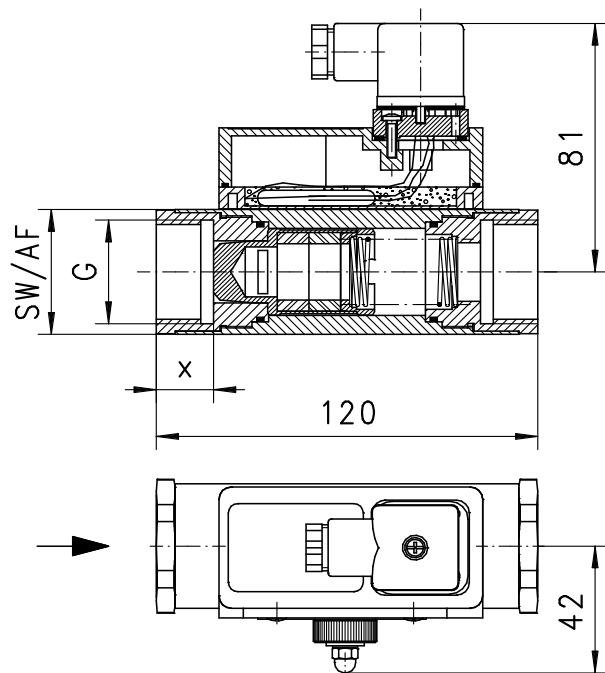
Female thread G1/4 - G1 brass/stainless steel

HD1K-020GM040

TECHNICAL DATA

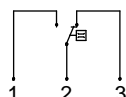
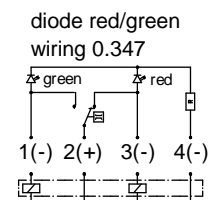
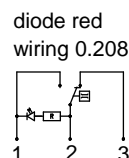
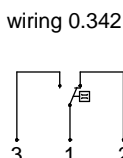
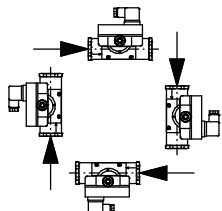
	G	Type	PN bar	Qmax. recom. l/min H_2O	adjustable range l/min H_2O			AF mm	X mm	weight kg
brass	G 1/4	HD1K-008GM005	200	10	0.5 - 5			40	15	1.3
	G 3/8	HD1K-010GM...	200	20	0.5 - 5	1 - 10		40	15	1.3
	G 1/2	HD1K-015GM...	200	40	1 - 10	2 - 20	3 - 30	40	15	1.2
	G 3/4	HD1K-020GM...	200	60	3 - 30	4 - 40		40	18	1.2
	G 1	HD1K-025GM...	200	80	4 - 40	6 - 60		40	18	1.1
stainless steel	G 1/4	HD1K-008GK005	200	10	0.5 - 5			41	15	1.3
	G 3/8	HD1K-010GK...	200	20	0.5 - 5	1 - 10		41	15	1.3
	G 1/2	HD1K-015GK...	200	40	1 - 10	2 - 20	3 - 30	41	15	1.2
	G 3/4	HD1K-020GK...	200	60	3 - 30	4 - 40		41	18	1.2
	G 1	HD1K-025GK...	200	80	4 - 40	6 - 60		41	18	1.1

Adjustable range is indicated for horizontally decreasing flow.

tolerance	±5% of full scale
media temperature	max. 120℃
average pressure loss	0.5 bar at Qmax.
hysteresis	depending on switch value minimum 0.7 l/min.

MATERIALS

	HD1K-...GM	HD1K-...GK
body	brass Ms58 nickel plated	stainless steel 1.4571
piston	brass Ms58	stainless steel 1.4404
spring	stainless steel 1.4310	stainless steel 1.4310
magnet	bariumferrite	bariumferrite PTFE plated
seals	NBR	viton
switch head	polycarbonate	polycarbonate

ELECTRICAL DATA

reed switch - wiring 0.213 change over
250 V AC 1.5 A 50 VA
plug DIN 43650-A
protection class IP 65

MOUNTING POSITION

Installation position may influence switch value.

METERING SUBSTANCES

water

gas/air

oil

design stainless steel HD1K-...GK for aggressive liquids

NOMENCLATURE

For combination see table "technical data"

HD1K	-	008	G	M	005				
									basic type
									specification
HD1K							●		Flow Switch
H1							❍		Flow Indicator
	-						●		without metering unit
	O-						❍		with lateral flow metering unit (Description see next page.)
	Z-						❍		with front flow metering unit (Description see next page.)
		008					●	nominal diameter	DN 8 - G1/4
		010					●	nominal diameter	DN 10 - G3/8
		015					●	nominal diameter	DN 15 - G1/2
		020					●	nominal diameter	DN 20 - G3/4
		025					●	nominal diameter	DN 25 - G1
			G				●		female thread
				M			●		brass
				K			●		stainless steel
					005		●	adjustable range H_2O horizontal	0.5 - 5 l/min
					010		●	adjustable range H_2O horizontal	1 - 10 l/min
					020		●	adjustable range H_2O horizontal	2 - 20 l/min
					030		●	adjustable range H_2O horizontal	3 - 30 l/min
					040		●	adjustable range H_2O horizontal	4 - 40 l/min
					060		●	adjustable range H_2O horizontal	6 - 60 l/min
						A	❍	Ex	switch ATEX (produkt information 92.1.H1-1)
						E	❍		connection by local electronic (e.g. omni-HD1K)
Programme option BASIC							❍		wiring 0.342 wiring 0.208 - diode red integrated in plug DIN 43650-A wiring 0.347 - diode red/green integrated in plug DIN 43650-A
Special option VARIO							❑	GL	high pressure PN 400 bar / 500 bar incremented scale switch head metal flat switch head plastic selected hysteresis / vibration-proof rhodium contact contact for locking plug M 12x1, 4-pole two to four independent switch heads setting / adjustable ranges for oil or gas special setting approval Germanischer Lloyd type HR

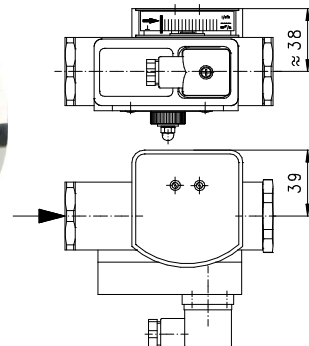
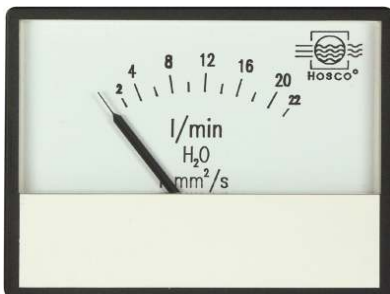
IMPORTANT FOR YOUR ORDER

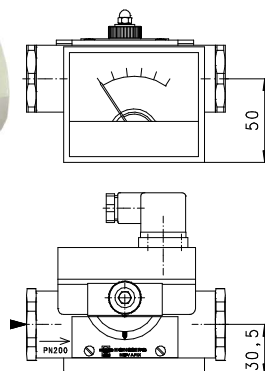
- Please indicate flow direction, metering substance and adjustable range with your order.
- With viscous liquids please indicate viscosity, temperature and metering substance (adjustable range on request)
- With gaseous media indicate pressure (relative or absolute), temperature and metering substance (adjustable range on request)

●BASIC Standard ❍BASIC Programme option ❑VARIO Special option ⊕ PLUS Accessories not recommendable

❍ HD1KO- Flow Switch with lateral flow metering unit

adjustable range l/min H_2O	metering range l/min H_2O
0,5 - 5	0,5 - 6
1 - 10	1 - 12
2 - 20	2 - 23
3 - 30	4 - 34
4 - 40	5 - 45
6 - 60	5 - 65

The metering range is indicated for horizontally increasing flow
protection class IP 60
additional weight 0.1kg

❍ HD1KZ- Flow Switch with front flow metering unit

adjustable range l/min H_2O	metering range l/min H_2O
0,5 - 5	0,5 - 6
1 - 10	1 - 12
2 - 20	2 - 22
3 - 30	3 - 34
4 - 40	4 - 45
6 - 60	5 - 65

The metering range is indicated for horizontally increasing flow
media temperature max. 70°C
protection class IP 40
additional weight 0.1kg

EXAMPLES FOR FURTHER OPTIONS

switch head metal or flat switch head plastic, switch head ATEX

media temperatuer 150°C
combinably with all Honsberg-electronics sensors or electronics heads

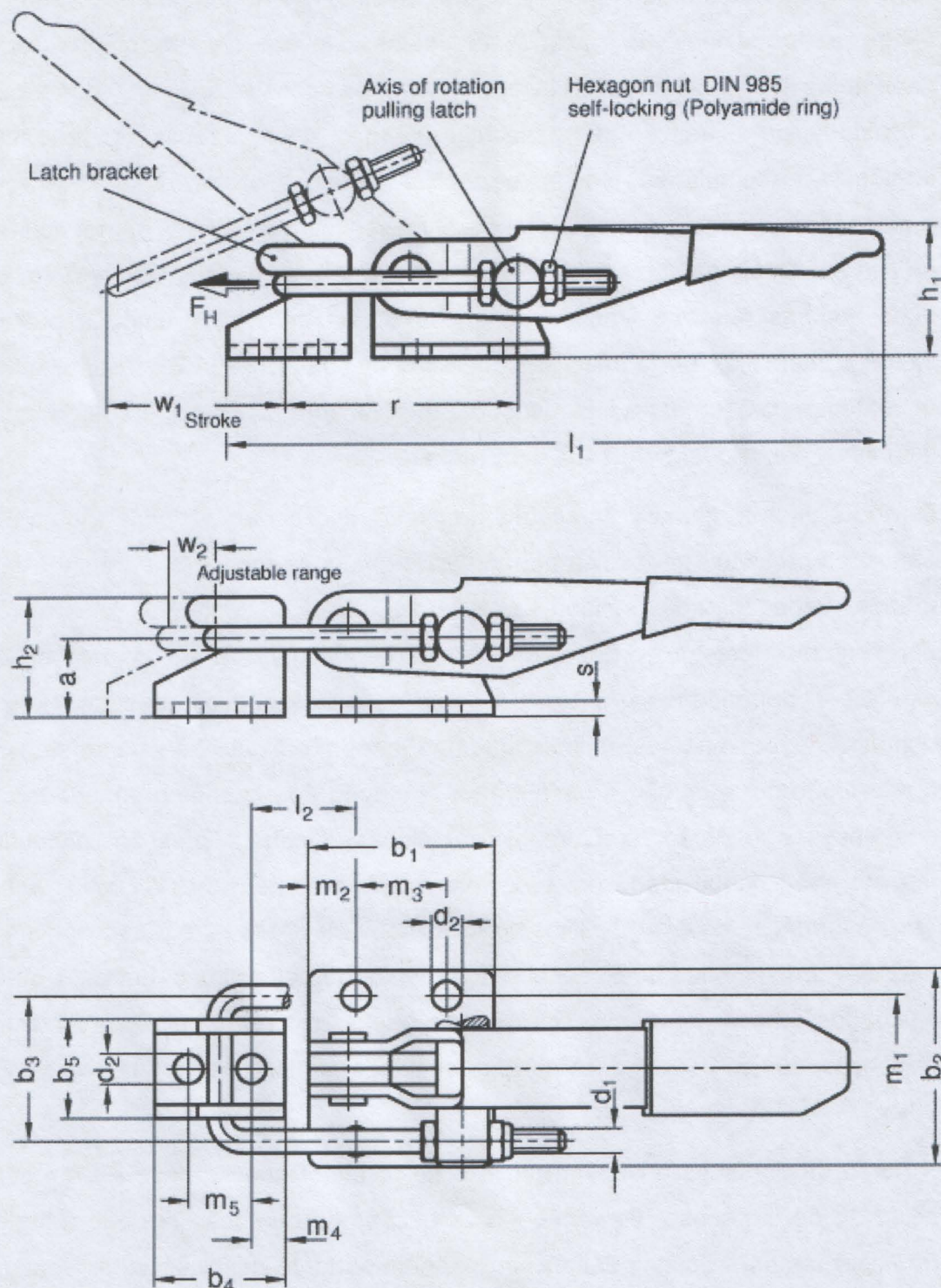
Flex-K-HD1K
switch- or frequency output
0..10V or 4..20mA
PNP, NPN

omni-HD1K
2xNPN and PNP switch point
4(0)..20mA ouput
graphical LCD display
with flashing LED, program ring

IBASIC Standard ❍BASIC Programme option ❑VARIO Special option ⊕ PLUS Accessories not recommendable

Grampos

with pulling action

GN 851 St.Steel-Latch clamps

Type **T2** Pulling latch /Clamping arm parallel to the plane of the operating handle

Size	FH [N]	a	b1	b2	b3	b4	b5	d1	d2	h1	h2

	Holding force										
160	1600	12	26	28	21	20	14	M4	4,3	22	18
320	3200	16	40	44	32	28	22	M6	6,5	30	25
700	7000	24	60	54	39	38	27	M8	8,5	50	37

Size	l1~	l2 min.	m1	m2	m3	m4	m5	r	s	w1 Stroke	w2~ Adjustable range
160	98	12	19	5	16	5	10	34	2	25	9
320	152	19,5	32	10,5	19	7	14	54	3	38	9
700	240	22	38	9,5	41,5	9,5	19	65	3,5	54	20

Specification

NI Stainless Steel
Sheet metal parts
German Material
No. 1.4301

Pulling latch / pin
German Material
No. 1.4305

All moving parts lubricated with special grease

Handle with plastic sleeve red, oil resistant

Stainless Steel characteristics

Information

St. Steel-Latch clamps GN 851 allow a toggle and safe locking of lids and covers.

The stroke of the pulling latch can be adjusted within its range.

In the clamped position the operarating lever with clamping arm is parallel to the plane of the operating lever.

General information for toggle clamps

Latch clamps GN 851 (with pulling action) (steel, zinc plated)

How to order

St.Steel-Latch clamp

GN 851-160-T2-NI

Code no. **851**
Size **160**
Type **T2**
St. Steel **NI**

Fibras

A-3124 OBERWÖLBLING
UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

VAKUUMGEFORMTE STANDARDQUALITÄTEN VACUUMFORMED STANDARDQUALITIES

Kennwerte	AV 50	AV 60	AV 70	AV 50/50	AV 50/75	AV 60/50	AV 70/50	Characteristics
Klassifikationstemperatur	1260°C	1430°C	1600°C	1400°C	1400°C	1500°C	1600°C	***Max. use temperature***
Max. Daueranwendungstemperatur	1100°C	1300°C	1500°C	1200°C	1200°C	1350°C	1500°C	***Continoustemperature***
Rohdichte *[kg/m³]*	280-350	280-350	280-350	400-500	> 800	400-500	400-500	***bulk density [kg/m³]***
Lineare Schwindung *[%]*								***Linear shrinkage [%]***
bei 1000°C	2,0	1,5	--	--	--	--	--	*at 1000°C*
bei 1100°C	2,5	2,0	--	1,5	1,0	--	--	*at 1100°C*
bei 1200°C	3,0	2,5	--	2,5	2,5	1,5	--	*at 1200°C*
bei 1300°C	--	3,0		3,5	3,5	2,5	1,5	*at 1300°C*
bei 1400°C	--	3,5	1,0	--	--	4,0	2,5	*at 1400°C*
bei 1500°C	--	--	1,0	--	--	--	--	*at 1500°C*
bei 1600°C	--	--	2,0	--	--	--	3,0	*at 1600°C*
Chemische Richtanalyse *[%]*								***Chemical Analysis [%]***
Al_2O_3	46	53	67	58	79	71	73	Al_2O_3
SiO_2	52	46	31	42	21	28	27	SiO_2
Wärmeleitfähigkeit *[W/mK]*								***Thermal conductivity [W/mK]***
bei 600 °C	0,11	0,12	--	0,20	0,27	0,20	0,20	*at 600 °C*
bei 800 °C	0,15	0,16	0,13	0,25	0,30	0,25	0,25	*at 800 °C*
bei 1000 °C	0,21	0,24	0,18	0,29	0,35	0,28	0,28	*at 1000 °C*
bei 1200 °C	--	0,35	0,24	0,32	0,39	0,32	0,32	*at 1200 °C*
Spez. Wärme *[kJ/kgK]*	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	***Specific heat [kJ/kgK]***
Durchschlagsfestigkeit *[V/mm]*	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	***Dielectric strength [V/mm]***

AV50**G** gehärtet/hardened (Dichte steigt um +50 bis 100kg/m³ /density increase about +50 up to 100kg/m³)
AV50**G4** gehärtet und gebrannt/hardened and prefired
AV50/**4** gebrannt/prefired
AV50**GC** gehärtetund gecoatet/hardened and coated

Information contained in this publication is for illustrative purposes only and isn't intended to create any contractual obligation. The information corresponds to the made experiences in the laboratory and company. It could only be seen as an estimated data considering the varying attitudes.
Die Informationen in dieser Veröffentlichung sind nach bestem Wissen der Alfatec Ges.m.b.H. korrekt. Die Angaben entsprechen den im Labor und im Betrieb gemachten Erfahrungen. Sie können in Anbetracht der wechselnden Verhältnisse nur als Anhalt dienen und sind in diesem Sinne als unverbindlich anzusehen, d.h. dem Kunden obliegt jedoch stets die Verantwortung dafür sicherzustellen, daß die Alfatec-Materialien für den beabsichtigten Verwendungszweck geeignet sind.

Stand 24.11.03 / D

Vacuumformed HIGH TEMPERATURE QUALITIES
Vakuumgeformte HOCHTEMPERATURQUALITÄTEN

Qualität	1700/400	1750/300	1750/500	Quality
Klassifikations-temperatur	1700°C	1750°C	1750°C	**Max. use temperature**
Daueranwendungs-temperatur	1700°C	1750°C	1750°C	**Continous temperature**
Mindest-Rohdichte [kg/m³]	350-450	300-400	450-550	**Minimum bulk density [kg/m³]**
Lineare Schwindung [%] 1600°C 1700°C 1750°C	-0,1% 0,2% --	-0,2% -0,1% 0,5%	0,0% 0,4% 2,0%	**Linear shrinkage [%]** at 1600°C at 1700°C at 1750°C
Chemische Richtanalyse[%] Al_2O_3 SiO_2	80% 20%	80% 20 %	80% 20%	**Typical chemical Analysis [%]** Al_2O_3 SiO_2
Wärmeleitfähigkeit [W/mK] 800°C 1000°C 1200°C 1400°C	0,21 0,23 0,26 0,31	0,20 0,22 0,25 0,30	0,22 0,24 0,28 0,33	**Thermal conductivity [W/mK]** at 1200 °C at 1400 °C
Spezifische Wärme [kJ/kgK]	1,04	1,04	1,04	**Specific Heat [kJ/kgK]**
Durchschlags-festigkeit [V/mm]	3000	3000	3000	**Dielectric strength [V/mm]**

Information contained in this publication is for illustrative purposes only and isn't intended to create any contractual obligation.
The information corresponds to the made experiences in the laboratory and company. It could only be seen as an estimated data considering the varying attitudes.

Die Informationen in dieser Veröffentlichung sind nach bestem Wissen der Alfatec Ges.m.b.H. korrekt. Die Angaben entsprechen den im Labor und im Betrieb gemachten Erfahrungen. Sie können in Anbetracht der wechselnden Verhältnisse nur als Anhalt dienen und sind in diesem Sinne als unverbindlich anzusehen, d.h. dem Kunden obliegt stets die Verantwortung sicherzustellen, daß die Alfatec-Materialien für den beabsichtigten Verwendungszweck geeignet sind.

AIDBQW17, Stand 30.01.2006 / C

ALFATEC
FEUERFEST – FASER-TECHNIK GES.M.B.H.
A-3124 OBERWÖLBLING UNTERWÖLBLING 75 UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

KERAMIKFASERFREIE VACUUMGEFORMTE STANDARDQUALITÄTEN

VACUUMFORMED STANDARDQUALITIES FREE OF CERAMIC FIBRE

Kennwerte	AV 35	AV 1100	AV 1100/400	AV 1200	AV 1200/500	Characteristics
Klassifikationstemperatur	850°C	1100°C	1150°C	1260°C	1260°C	***Max. use temperature***
Max. Daueranwendungstemperatur	800°C	1000°C	1050°C	1200°C	1200°C	***Continoustemperature***
Rohdichte *[kg/m³]*	280-350	280-350	380-450	280-350	450-550	***bulk density [kg/m³]***
Lineare Schwindung *[%]*						***Linear shrinkage [%]***
bei 800°C	2,3	--	--	1,0	1,0	*at 800°C*
bei 1000°C	--	1,5	1,5	2,5	2,0	*at 1000°C*
bei 1100°C	--	< 3,0	< 2,0	4,5	4,0	*at 1100°C*
Chemische Richtanalyse *[%]*						***Chemical Analysis [%]***
SiO_2	56	61	40	64,7	36,8	SiO_2
CaO	19	25	16	--	--	CaO
MgO	3	3	2	16,3	8,3	MgO
Al_2O_3	17	10	40	17,7	54,2	Al_2O_3
Fe_2O_3	< 5	< 0,5	< 0,4	< 0,5	< 0,5	Fe_2O_3
Wärmeleitfähigkeit *[W/mK]*						***Thermal conductivity [W/mK]***
bei 400 °C	0,09	0,06	0,06	0,09	0,10	*at 400 °C*
bei 600 °C	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	*at 600 °C*
bei 800 °C	0,15	0,14	0,15	0,15	0,16	*at 800°C*
bei 1000 °C	--	0,22	0,23	0,21	0,24	*at 100 °C*
Spez. Wärme *[kJ/kgK]*	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	***Specific heat [kJ/kgK]***
Durchschlagsfestigkeit *[V/mm]*	3000	3000	3000	3000	3000	***Dielectric strength [V/mm]***

AV35**G** gehärtet/hardened (Dichte steigt um +50 bis 100kg/m³ /density increase about +50 up to 100kg/m³)
AV35**G4** gehärtet und gebrannt/hardened and prefired
AV35**/4** gebrannt/prefired
AV35**GC** gehärtetund gecoatet/hardened and coated

 AIDBQW50 **Stand 05.12.03**

A-3124 OBERWÖLBLING UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

VAKUUMGEFORMTE WEICHE STANDARDQUALITÄTEN

VACUUMFORMED SOFT STANDARDQUALITIES

Kennwerte	AV 50W	AV 60W	AV 65 W	AV 70W	Characteristics
Klassifikationstemperatur	1260°C	1430°C	1500°	1600°C	***Max. use temperature***
Max. Daueranwendungstemperatur	1100°C	1300°C	1400°	1450°C	***Continoustemperature***
Rohdichte *[kg/m³]*	200-260	200-260	200-260	200-260	***bulk density [kg/m³]***
Lineare Schwindung *[%]*					***Linear shrinkage [%]***
bei 1000°C	1,5%	--	--	--	*at 1000°C*
bei 1100°C	2,5%	2,0%	--	--	*at 1100°C*
bei 1200°C	3,5%	3,0%	2,0 %	--	*at 1200°C*
bei 1300°C	--	--	3,0 %	2,0%	*at 1300°C*
bei 1400°C	--	--	4,0 %	2,5%	*at 1400°C*
bei 1450°C	--	--	--	4,0%	*at 1450°C*
Chemische Richtanalyse *[%]*					***Chemical Analysis [%]***
Al_2O_3	47%	52%	62	68%	Al_2O_3
SiO_2	52%	47%	37	31%	SiO_2
Wärmeleitfähigkeit *[W/mK]*					***Thermal conductivity [W/mK]***
bei 400 °C	0,09	--	--	--	*at 400 °C*
bei 600 °C	0,11	0,12	0,15	0,15	*at 600 °C*
bei 800 °C	0,15	0,16	0,16	0,16	*at 800 °C*
bei 1000 °C	0,21	0,24	0,24	0,24	*at 1000 °C*
bei 1200 °C	--	0,35	0,36	0,37	*at 1200 °C*
Spez. Wärme *[kJ/kgK]*	1,04	1,04	1,04	1,04	***Specific heat [kJ/kgK]***
Durchschlagsfestigkeit *[V/mm]*	3000	3000	3000	3000	***Dielectric strength [V/mm]***

Information contained in this publication is for illustrative purposes only and isn't intended to create any contractual obligation. The information corresponds to the made experiences in the laboratory and company. It could only be seen as an estimated data considering the varying attitudes.

Die Informationen in dieser Veröffentlichung sind nach bestem Wissen der Alfatec Ges.m.b.H. korrekt. Die Angaben entsprechen den im Labor und im Betrieb gemachten Erfahrungen. Sie können in Anbetracht der wechselnden Verhältnisse nur als Anhalt dienen und sind in diesem Sinne als unverbindlich anzusehen, d.h. dem Kunden obliegt jedoch stets die Verantwortung dafür sicherzustellen, daß die Alfatec-Materialien für den beabsichtigten Verwendungszweck geeignet sind.

Stand 24.11.03

A-3124 OBERWÖLBLING
UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

KERAMIKFASERMATTEN — CERAMIC FIBRE BLANKETS

Kennwerte	CMS 1100	RT 1260	HP 1260	MZ 1400	CZ 1430	AKM 1600	Characteristics
Klassifikationstemperatur	1100°C	1260°C	1300°C	1400°C	1430°C	1600°C	***Max. use temperature***
Rohdichte *[kg/m³]*	**96 / 128 / 160**						***bulk density [kg/m³]***
x% Lineare Schwindung *[24h]* *bei*	3%, 1000°C	3%, 1200°C	3%, 1300°C	3%, 1350°C	3%, 1400°C	1 %, 1600°C	***x% Linear shrinkage [24h] at***
Chemische Richtanalyse *[%]*							***Chemical Analysis [%]***
Al_2O_3	1,0	46	49	40	33	72	Al_2O_3
ZrO_2	-	-	-	10	17	-	ZrO_2
SiO_2	66	52	50	49	49	28	SiO_2
CaO	39	-	-	-	-	-	*CaO*
MgO	4	-	-	-	-	-	*MgO*
Wärmeleitfähigkeit *[W/mK]*, *Dichte 128kg/m³*							***Thermal conductivity [W/mK], density 128 kg/m³***
bei 600 °C	0,13	0,14	-	-	-	-	*at 600 °C*
bei 800 °C	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,17	*at 800 °C*
bei 1000 °C	--	0,27	0,27	0,27	0,27	0,24	*at 1000 °C*
bei 1200 °C	-	-	0,36	0,36	0,36	0,33	*at 1200 °C*
bei 1400 °C	-	-	-	-	-	0,48	*at 1400 °C*
Spez. Wärme *[kJ/kgK]*	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	***Specific heat [kJ/kgK]***
Dimensionen lieferbar	**A** exkl. 6mm	**A**	**A**	**A**	**A**	**B**	***Dimension available***

STANDARD DIMENSIONEN

A Dicke / Thickness	6mm (1/4")	13mm (1/2")	25mm (1")	38mm (1½")	50mm (2")
Standard Dimension	22x0.61m	14.40x0.61m	7.20 x0.61m	4.88x0.61m	3.60x0.61m

Weitere Dimensionen lieferbar / other dimensions available

Dicke / Thickness	--	13mm (1/2")	25mm (1")	38mm (1½")	50mm (2")
Dimension	--	8.5x0.6m	5x0.6m	3.5x0.6m	3.5x0.6m

B Dicke / Thickness	6mm (1/4")	13mm (1/2")	25mm
Dimension	3.6x0.61m	3.6x0.61m	3.6x0.61

AIDBQW01
Stand 15.03.04/D

PLASTMASSEN **mouldables/mastics**

KENNWERTE ALFAPLAST	**AP50/100**	**FM 90**	**APO 262**	**APO 55**	**APO 60**	**APO 75**	**APO 95/70**	**Characteristics** ***ALFAPLAST***
Daueranwendungstemperatur **[°C]**	1250	1250	1250	1430	1500	1600	1750	Continous temperature **[°C]**
Rohdichte trocken **[kg/m³]**	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	Bulk density dry **[kg/m³]**
Linearschwindung bei **[°C]**								Linear shrinkage at **[°C]**
1000	0,1	0,1	-	--	--	--	--	1000
1100	0,3	0,3	0,2	--	--	--	--	1100
1200	1,6	1,6	--	--	0,2	0,1	--	1200
1400	--	--	--	0,5	--	--	--	1400
1600	--	--	--	--	--	--	0,1	1600
Wärmeleitfähigkeit W/mK bei [°C]								Thermal conductivity W/mK at [°C]
600	0,28	0,28	0,25	0,25	0,28	0,28	0,28	600
800	0,32	0,32	0,30	0,30	0,32	0,32	0,32	800
1000	0,43	0,43	0,41	0,41	0,43	0,43	0,43	1000
1200	0,55	0,55	--	0,52	0,55	0,55	0,55	1200
1400	--	--	--	0,65	0,68	0,68	0,68	1400
Chem. Richtanalyse [%]								Typical chemical analysis [%]
Al_2O_3	67%	67%	64%	66%	70%	72%	78%	Al_2O_3
SiO_2	33%	33%	36%	34%	30%	28%	22%	SiO_2
Organischer Anteil	--	--	(1,5%)	(1,5%)	(1,5%)	(1,5%)	(1,5%)	Organic fraction

Stand 15.03.04 / E, AIDBQW06

A-3124 OBERWÖLBLING
UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

FEUERFESTES KERAMIKFASERPAPIER **CERAMICFIBRE-PAPER**

KENNWERTE	AKP 1100	AKP 1260	AKP 1430	AKP 1600	Characteristics
Klassifikations-temperatur	1100°C	1260°C	1430°C	1600°C	Max. use temperature
Rohdichte **kg/m^3**	200-300	190 - 240	210 - 240	150 - 200	Bulk density **kg/m^3**
Chemische Richtanalyse **%**					Typical chemical analysis **%**
Al_2O_3	<1,0	47	38	90	Al_2O_3
SiO_2	64	53	48	10	SiO_2
MgO	4	--	--	--	MgO
CaO	30	--	--	--	CaO
ZrO_2	--	--	14	--	ZrO_2
Spez. Wärme bei 1000°C **kJ/kgK**	1,05	1,05	1,11	1,20	Specific heat at 1000°C **kJ/kgK**
Elektr. Durchschlag-festigkeit **kV/mm**	3,5	3,5	3,50	3,90	Dielectric strength **kV/mm**
Wärmeleitfähig-keit **W/mK**					Thermal conductivity **W/mK**
bei 600°	0,10	0,10	0,11		bei 600°
bei 800°	0,15	0,15	0,17	0,22	bei 800°
bei 1000°		0,22	0,25	0,27	bei 1000°
bei 1200°				0,33	bei 1200°
bei 1400°				0,42	bei 1400°
Zugfestigkeit **(kPa)**	>350	>350	>350	>350	Tensile strength **(kPa)**
4 % Lineare Schwindung bei °C	1100	1200	1400	1600	4 % linear shrinkage at °C

Erstellt von,am: TG 23.10.2003	Geprüft/Freigabe von,am: TG 23.10.2003	Änderungsstand: B	Reg.-Nr.: AIDBQW03

A-3124 OBERWÖLBLING
UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

Kleber — cements

KENNWERTE Kleber	**A1 1260**	**A3 1260**	**1400**	**HT1800**	**Characteristics** ***Cement***
Daueranwendungstemperatur **[°C]**	1500	1500	1600	1800	Continous temperature **[°C]**
Dichte (trocken) **[kg/m³]**	1800	1800	1600	1600	Bulk density (dry) **[kg/m³]**
Chemische Analyse [%]					Typical chemical analysis [%]
Al_2O_3	74,5%	74,0%	76,0%	1,0%	Al_2O_3
SiO_2	17,5%	18,5%	23,5%	34%	SiO_2
Na_2O	7,5%	7,0%	<0,5%	--	Na_2O
MgO	<0,1%	<0,4%	--	--	MgO
Fe_2O_3	--	--	--	<0,1%	Fe_2O_3
ZrO_2	--	--	--	63,0%	ZrO_2
Organischer Anteil	--	--	1,5%	1,5%	organic fraction
Anwendung	Faser-Metall Fibre-Metal	Faser-Metall Fibre-Metal	Faser-Faser Fibre-Fibre	Faser-Faser Fibre-Fibre	Application

Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus der laufenden Produktion. These values are on an average from our production-data.

Verarbeitungshinweis: Vor Gebrauch gut aufrühren. Kleber auf staub- und fettfreiem nicht saugendem-, oder staubfreiem und vorgenässtem Untergrund auftragbar. Die Konsistenz ist mit max. 15 Gewichts% H_2O nachstellbar. Material ist bei Temperaturen von 10-25°C dicht verschlossen min. 12 Monate lagerbar.	**Working information:** The glue must be mixed before using. The surface which will be glued, has to be free from dust and oil. Surfaces with a high absorptive capacity have to be wetted with water before . You can adjust the consistence with max. 15% (weight) H_2O. You can store material in closely packed canes for min. 12 months by temperatures 10°C-25°C.

Stand 15.03.04 / A , AIDBQW07

A-3124 OBERWÖLBLING
UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

Coating

Coating

KENNWERTE Coating	**Alfafix 1500A**	**Alfafix 1500E**	**BS**	**BS4**	**Characteristics** ***Coating***
Daueranwendungstemperatur **[°C]**	1500	1500	1500	1500	Continous temperature **[°C]**
Dichte (trocken) **[kg/m³]**	1600	1600	1600	1600	Bulk density (dry) **[kg/m³]**
Chemische Analyse [%] Al_2O_3 SiO_2 $BaSO_4$ Organischer Anteil	 88,0% 10,5% -- (1,2%)	 84% 16% -- (1,0%)	 62% 21,5% 16,0% (0,5%)	 83,8% -- 14,5 (0,6%)	Typical chemical analysis [%] Al_2O_3 SiO_2 $BaSO_4$ organic fraction
Anwendung	Standardcoatings für normale Aluminiumlegierungen. (Index E ist dünnflüssiger als A) *Standardcoatings for normal Aluminiaalloys (Index E has a lower viskosity than A)*		Aluminiumlegierung. Bei höheren Mg- oder Flußmittel-Anteilen empfehlen wir **Coating BS4.** *For* Aluminiaalloys with high Mg- or fluxmaterial contents we recommend **Coating BS4.**		Application
Für Schichtdicken von 0,5-1mm liegt der Verbrauch bei ca. 1 kg/m².					For thickness about 0,5-1mm you will need about 1kg/m²

Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus der laufenden Produktion.

These values are on an average from our production-data.

Verarbeitungshinweis: Vor Gebrauch gut aufrühren.
Coating auf staub- und fettfreiem nicht saugendem-, oder staubfreiem und vorgenässtem Untergrund auftragbar.
Die Konsistenz ist mit max. 15 Gewichts% H_2O nachstellbar.
Material ist bei Temperaturen von 10-25°C dicht verschlossen min. 12 Monate lagerbar.

Working information: The Coating must be mixed before using. The surface which will be coated, has to be free from dust and oil. Surfaces with a high absorptive capacity have to be wetted with water before .
You can adjust the consistence with max. 15% (weight) H_2O.
You can store material in closely packed canes for min. 12 months by temperatures 10°C-25°C.

Stand 15.03.04 / B, AIDBQW11

A-3124 OBERWÖLBLING UNTERWÖLBLING 75
UID-Nr. ATU 199 68 408
TELEFON: 0 27 86 / 26 45 bzw. 77 120
TELEFAX: 0 27 86 / 26 45-8
E-MAIL: office@alfatec.co.at
INTERNET: www.alfatec.co.at

Generally working-instructions for **ALFATEC Cements and Coatings**

Discription:

ALFATEC Cements and Coatings are ceramic bounded, fire-proof materials including mineral fillers and organic substances which are responsible for a ideal working-consistence.

For preventation against sedimention, ALFATEC Cements and Coatings are artificial thickened.This is the reason why **ALFATEC Coatings and Cements** have to be mixed before using.The consistence can be adjust with max. 15% (weigth) by water.

The surface on which the Coating or Cement gets worked on has to be free from dust and oil or grease.
Surfaces with a high absortive capacity have to be wetted with water before.

You can apply the **ALFATEC Cements and Coatings** with a brush, spatula or a painter-roll and especially coatings with spray gun too.
If you want to get a thicker coating you have to coat in some working- steps.
Please note: If the coating si spread to thick in one layer it could crack.
Rough surfaces you can make equal and smoother as desived with ALFATEC Mastics or Cements.

Coatings and Cements could be dried at air temperatures about 25°C in 24 up to 48 hours. A faster drying will be reached at temperatures about 60-100°C in a dehumidifier. Drying time depends on the material thickness, air humidity and other parameters but it will be about 3 up to 6 hours.

You can store the material in closely canes for min. 6 months by temperatures about 10-25°C.

TG 15.03.04

Generally guiding rules for processing with **MASTICS – Types of ALFAPLAST**

Description:
Mastics are plastic deformable compounds made from ceramic- or mineral-fibre and an inorganic-or organic binder. It is supplied premixed and ready for use. It hardens irreversible and can be used up to 1800°C constant load.

Application:
Basically for all matters of isolation, which are exposed to a mechanical wear as e.g. “Runner troughs, ladle linings, feeder” for gearing of recently drawn glass. Moreover suitable as a repair substance to existing “stone or refractory concrete walls” to prevent further destruction caused by rapidly varying temperature.

Fitting:
The application of ALFAPLAST depends on the special case of isolation; either with one’s bear hands (e.g. small troughs of different radius) or with a surfacer. We recommend to smooth the visible surface after the complete application of the insulating layer with Mastic in order to avoid possibly
occurring wash-outs. It is also recommend to use coatings either Coating BS4 or Coating Alfafix 1500A or currently used in factory of customer which increases the operating life.
If the thickness of the layer exceed 50mm we recommend wide meshed material resp. “Stretch-metal” may be indented to prevent any cracking caused by fast drying.
Whenever operating with types of ALFAPLAST you should use rubber-gloves because of a slight alkaline character of the economic binder.

Drying:
At a regular thickness of the layer resp. up to a thickness of about 30mm dry at 105°C-140°C for about 6-9hours.
A irregular wall thickness resp. more than 50mm dry up for about 4 hours at 80°C, afterwards at 120°C-140°C for about 6-9 hours.
After drying, cracks may occur. Fill the cracks again with Alfaplast and get a monolitic lining again.
It is also possible to use ALFAPLAST on hot surfaces of feeders (glas) on forheath. In case of cracks, caused by drying, there is no problem to put new mastic into the grooves and dry it again.
The strength properties will no change.

TG 15.03.04